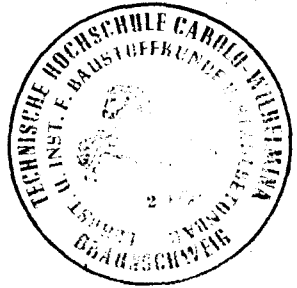


30-0380/001

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. K. KORDINA – PROF. DR.-ING. G. REHM

K
37



Durchlaufende Stahlbetonkonstruktionen

unter Brandbeanspruchung

Vorläufiger Endbericht erstattet von

Herbert Ehm

Lore Krampf

Rolf von Postel

August 1968 (Teil A)

September 1970 (Teil B)

Die Untersuchungen wurden im Auftrage des Ministers für Wohnungsbau und öffentliche Arbeiten des Landes Nordrhein-Westfalen auf Veranlassung durch den Deutschen Ausschuss für Stahlbeton durchgeführt.

<u>Inhaltsübersicht</u>	Seite
Verzeichnis der Tafeln	4
Verzeichnis der Bilder	5
Verzeichnis der Anlagen	6
<u>Teil A</u>	
1. Allgemeines, Zweck der Untersuchungen, Versuchsprogramm	8
2. Beschreibung der Versuchsbalken	10
2.1 Querschnitte und statisches System	10
2.2 Baustoffe	16
3. Versuchsaufbau und -durchführung	17
3.1 Brandkammer	17
3.2 Einbau und Belastung der Versuchsbalken	18
3.3 Beheizung	19
3.4 Messungen während der Brandversuche	20
3.4.1 Temperaturen im Brandraum	20
3.4.2 Temperaturen in den Versuchsbalken	20
3.4.3 Zugkräfte an der Abspannvorrichtung	20
3.4.4 Dehnungen an der Bewehrung	21
3.4.5 Verformungen	21
4. Versuchsergebnisse	22
4.1 Meßwerte	22
4.1.1 Temperaturen im Brandraum	22
4.1.2 Temperaturen im Bauteil	22
4.1.3 Zugkräfte an der Abspannvorrichtung	22
4.1.4 Dehnungen an der Bewehrung	24
4.1.5 Verformungen der Versuchskörper	25
4.2 Sonstige Beobachtungen	25
4.3 Zusammenfassung wichtiger Versuchsdaten	27
5. Zusammenfassung und Deutung der Versuche	27
<u>Teil B</u>	
6. Allgemeines, Zweck der Untersuchungen, Versuchsprogramm	31
7. Beschreibung der Versuchsbalken	31

	Seite
7.1 Querschnitte und statisches System	31
7.1.1 Balken I	32
7.1.2 Balken II	33
7.1.3 Balken III	35
7.2 Baustoffe	37
7.3 Meßquerschnitte	38
7.4 Lagerung und Trocknung	38
8. Versuchsaufbau und -durchführung	39
8.1 Brandraum und Beheizung	39
8.2 Einbau und Belastung der Versuchskörper	39
8.3 Meßprogramm	41
8.3.1 Messung der Brandraumtemperatur	41
8.3.2 Messung der Stahltemperatur	41
8.3.3 Messung der Stahltemperatur	41
8.3.4 Messung der Stahldehnung	41
8.3.5 Messung der vertikalen Durchbiegung	41
8.3.6 Messung der Verdrehung	41
8.3.7 Messung der Zugkräfte	41
8.4 Sonstige Beobachtungen	42
9. Versuchsergebnisse	42
9.1 Versuchskörper I	42
9.2 Versuchskörper II	46
9.3 Versuchskörper III	49
10. Diskussion der Versuchsergebnisse	51

Verzeichnis der Tafeln

Seite

<u>Teil A</u>	Tafel 1	Versuchsprogramm	9
	Tafel 2	Festigkeitswerte und Feuchtigkeits- gehalt des verwendeten Betons	16
	Tafel 3	Eingetragene und zulässige Biegemomente in den Versuchsbalken	19
	Tafel 4	Zusammenstellung der während des Brand- versuchs gemachten Beobachtungen	26
	Tafel 5	Zusammenstellung wichtiger Versuchsdaten	27
 <u>Teil B</u>	 Tafel 6	 Mischungsaufbau des verwendeten Betons	 37
	Tafel 7	Festigkeit und Feuchte des verwendeten Betons	38
	Tafel 8	Momente und Stahlzugspannungen	40
	Tafel 9	Beobachtungen am Versuchskörper I	45
	Tafel 10	" " II	47
	Tafel 11	" " III	50

Verzeichnis der Bilder

Bild 1	Versuchsaufbau			
Bild 2	Versuchsaufbau - Kragarm mit Verspann- und Meßeinrichtung			
Bild 3	Balken 1 (16/32) Draufsicht nach dem Brandversuch			
Bild 4	Balken 2 (16/32)	"	"	"
Bild 5	Balken 3 (20/40)	"	"	"
Bild 6	Balken 4 (20/40)	"	"	"
Bild 7	Balken 7 (20/40)	"	"	"
Bild 8	Balken 1 (16/32) Seitenansicht nach dem Brandversuch			
Bild 9	Balken 2 (16/32)	"	"	"
Bild 10	Balken 3 (20/40)	"	"	"
Bild 11	Balken 4 (20/40)	"	"	"
Bild 12	Balken 7 (20/40)	"	"	"
Bild 13	Balken 2 (16/32) Seitenansicht der Bruchstelle im Stützbereich			
Bild 14	Balken 4 (20/40)	"	"	"
Bild 15	Balken 4	Draufsicht der Bruchstelle im Stützbereich		
Bild 16	Balken I	Ansicht der Bruchstelle		
Bild 17	Balken I	"	"	"
Bild 18	Balken I	Gesamtansicht nach dem Brandversuch		
Bild 19	Balken I	"	"	"
Bild 20	Balken II	Ansicht der Bruchstelle		
Bild 21	Balken II	Ansicht des beheizten Feldes		
Bild 22	Balken II	Gesamtansicht nach dem Brandversuch		
Bild 23	Balken II	"	"	"
Bild 24	Balken III	Zermürbter Beton in der Biegedruckzone		
Bild 25	Balken III	"	"	"

Verzeichnis der Anlagen

Anlage	1.1	Versuchsaufbau - Längsschnitt
Anlage	1.2	" - Querschnitt
Anlage	2.1	Bewehrungsführung der Balken 1 und 2
Anlage	2.2	" der Balken 3, 4 und 7
Anlage	3.1	Temperaturmeßergebnisse Balken 1
Anlage	3.2	" Balken 2
Anlage	3.3	" Balken 3
Anlage	3.4	" Balken 4
Anlage	3.5	" Balken 6
Anlage	3.6	" Balken 7
Anlage	4.1	ΔM_{I-I} infolge Feuerangriff, Balken 1 und 2
Anlage	4.2	" " " , Balken 3, 4 und 7
Anlage	5.1	Dehnungsmeßergebnisse Balken 1
Anlage	5.2	" Balken 2
Anlage	5.3	" Balken 3
Anlage	5.4	" Balken 4
Anlage	5.5	" Balken 6
Anlage	5.6	" Balken 7
Anlage	6.1	Verformungsmeßergebnisse Balken 1
Anlage	6.2	" Balken 2
Anlage	6.3	" Balken 3
Anlage	6.4	" Balken 4
Anlage	6.5	" Balken 6
Anlage	6.6	" Balken 7
Anlage	7.1	Schal- und Bewehrungsplan Balken I
Anlage	7.2	" " " Balken II
Anlage	7.3	" " " Balken III
Anlage	8.1	Stahldeckung des plastischen Momentes, Balken I
Anlage	8.2	" " " " Balken II
Anlage	8.3	" " " " Balken III

Anlage 9	Spannungs-Dehnungsdiagramm des verwendeten Stahls St III b					
Anlage 10.1	Versuchsanordnung Balken I					
Anlage 10.2	"	Balken II				
Anlage 10.3	"	Balken III				
Anlage 11.1	Temperaturen im Brandraum und am Bewehrungsstahl Balken I					
Anlage 11.2	"	"	"	"	"	Balken II
Anlage 11.3	"	"	"	"	"	Balken III
Anlage 12.1	Änderung der Stahldehnung und -spannung und des Momentes über der Mittelstütze					Balken I
Anlage 12.2	"	"	"			Balken II
Anlage 12.3	"	"	"			Balken III
Anlage 13.1	Vertikaldurchbiegung Balken I					
Anlage 13.2	"	Balken II				
Anlage 13.3	"	Balken III				
Anlage 14.1	Verdrehung und horizontale Verschiebung der Endauflager					Balken I
Anlage 14.2	"	"				Balken II
Anlage 15	Änderung der Zugkraft am Kragarm und des Momentes über der Außenstütze					Balken III

Teil A

1. Allgemeines, Zweck der Untersuchungen, Versuchsprogramm

In den Jahren 1964 und 1965 wurden im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der T.U. Braunschweig 4 Brandversuche zum Studium des Verhaltens von statisch unbestimmt gelagerten Balken- und Deckenbauteilen durchgeführt. Hierfür wurde ein statisches System in der Art gewählt, daß ein Endfeld eines Durchlaufträgers simuliert und die äußeren temperaturbedingten Zwängungen auf einfache Weise gemessen werden konnten: es handelt sich um einen Träger auf zwei Stützen mit einem am Ende abgespannten Kragarm. Wegen der geringen Abmessungen des für die Untersuchung zur Verfügung stehenden Brandhauses konnten nur Bauteile mit einer Feldweite von 2,50 m geprüft werden.

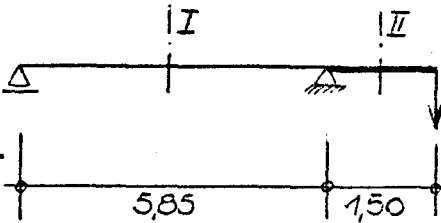
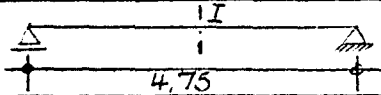
Die Versuche zeigten eindeutig, daß unter der Voraussetzung geeigneter Bewehrungsführungen eine wesentliche Vergrößerung der Feuerwiderstandsdauer infolge der Durchlaufwirkung erreicht werden kann. Der Bericht über diese Versuchsreihe wurde u.a. in "Feuerwiderstandsfähigkeit von Spannbeton", Ergebnisse einer Tagung der FIP in Braunschweig, Juni 1965, veröffentlicht. Der Deutsche Ausschuß für Stahlbeton hatte für die Durchführung der Versuche einen Zuschuß von DM 20.000,-- zur Verfügung gestellt.

Zwecks näherer Erforschung des Tragverhaltens wurden weitere Brandversuche für notwendig erachtet. Auf Veranlassung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton richtete das Institut an den Minister für Wohnungsbau und öffentliche Arbeiten des Landes Nordrhein-Westfalen den Antrag, die Finanzierung für eine Fortsetzung der Untersuchungen zu übernehmen. Das Ministerium bewilligte für 6 weitere Brandversuche an statisch unbestimmt gelagerten Stahlbetonbalken einen Zuschuß von DM 25.000,--. Das dem Antrag zugrunde gelegte Programm wurde als Rahmenprogramm aufgestellt. Es wurden u.a. 3 Versuchsstufen vorgesehen, um die Ergebnisse der ersten Brandversuche bei der konstruktiven Ausbildung der folgenden Versuchskörper zu berücksichtigen.

Das Ziel der Untersuchungen war, eine zweckmäßige, wirksame Bewehrungsführung für durchlaufende brandbeanspruchte Stahlbetonbalken zu ermitteln und den Einfluß der Biegesteifigkeit auf das Brandverhalten im Zusammenhang mit Zwängungsspannungszuständen infolge nichtlinearer Temperaturverteilung im Bauteilquerschnitt zu

Tafel 1 Durchlaufende Stahlbetonbalken unter Feuerangriff

Versuchsprogramm

Bez.		Statisches System	Querschnitte b_o/d_o in cm		Bewehrung in cm^2		Beton- güte	Betondeckung der untenlie- genden Feld- bewehrung in cm	Bewehrungsführung
			I	II	Feld (unten)	Stütze (oben)			
1. u. 2. Teil	1		16/32	16/48	2,6	4,4	B 300	2,3	Staffelung der Stütz- bewehrung nach dem plast. Stützmoment. Obenliegende Feldbe- wehrung $\text{Fe} = 1,0 \text{ cm}^2$.
	2		16/32	16/48	2,6	4,5	B 300	2,3	Staffelung der Stütz- bewehrung nach dem zulässigen Stützmoment. Obenliegende Feldbe- wehrung $\text{Fe} = 1,0 \text{ cm}^2$.
	3		20/40	20/60	4,7	6,9	B 300	2,3	Wie Balken 1. Obenliegende Feldbe- wehrung $\text{Fe} = 1,5 \text{ cm}^2$.
	4		20/40	20/60	4,7	6,9	B 300	2,3	Wie Balken 2. Keine obenliegende Feld- bewehrung.
3. Teil	7		20/40	20/60	4,7	6,9	B 300	2,3	Wie Balken 1. Keine obenliegende Feld- bewehrung.
	6		20/40	-	6,2	-	B 300	2,3	Obenliegende Feldbe- wehrung $\text{Fe} = 4,5 \text{ cm}^2$.

studieren. Hierbei war u.a. zu überprüfen, ob ein Eigenspannungszustand einen Beitrag zur Erhöhung der Feuerwiderstandsfähigkeit leisten kann.

Das Versuchsprogramm ist in Tafel 1 wiedergegeben.

Die Versuchsbalken 1 bis 4 bildeten den 1. und 2. Teil des Untersuchungsprogramms. Die Balken 2 und 4 (vergl. Tabelle) erhielten eine oben durchgehende Bewehrung von rd. $1/3$ erf. Fe_{Feld} . Die Staffelung der Stützbewehrung erfolgte unter Berücksichtigung der erforderlichen Verankerungslängen entsprechend dem Momentenverlauf bei Wirkung des zulässigen Stützmomentes aus gleichmäßig verteilter Belastung. Bei Balken 1 und 3 wurde ebenfalls eine obenliegende durchgehende Bewehrung von rd. $1/3$ erf. Fe_{Feld} vorgesehen. Die Staffelung der Stützbewehrung erfolgte aber hier nach dem Momentenverlauf, der sich bei Bildung eines plastischen Momentes über dem Stützquerschnitt einstellt. Die Stützbewehrung wurde demzufolge weiter in das Feld hineingezogen. Zur Verankerung wurden hier alle endenden Stäbe abgebogen.

In einem 3. Teil des Untersuchungsprogramms wurden Ergänzungsversuche durchgeführt (Versuchsbalken 6 und 7). Der Versuch mit Balken 6 (statisch bestimmt gelagerte Träger) sollte zur Klärung des Einflusses der Größe und des zeitlichen Verlaufes des Eigenspannungszustandes aus der nichtlinearen Temperaturverteilung im Balkenquerschnitt dienen. Der verhältnismäßig große Anteil der obenliegenden Bewehrung diente dem Zweck, den Eigenspannungszustand möglichst groß und lange aufrecht zu erhalten.

Bei Versuchsbalken 7 wurde keine obenliegende Bewehrung eingelegt. Die Staffelung der Stützbewehrung erfolgte wie für Balken 3 nach dem Momentenverlauf bei Annahme eines plastischen Momentes über dem Stützquerschnitt.

2. Beschreibung der Versuchsbalken

2.1 Querschnitte und statisches System

Für die im Abschnitt 1 genannten Brandversuche an Durchlaufbalken in den Jahren 1964/65 wurden T-förmige Balkenquerschnitte mit Balkenabmessungen

von $d_o = 32$ cm und $b_o = 16$ cm gewählt. Die Abmessungen der oberen Gurtplatte betragen $b = 40$ cm und $d = 8$ cm.

Für die Balken 1 und 2 der vorliegenden Versuchsreihe wurden diese Querschnitte beibehalten, um eine vergleichende Auswertung zu ermöglichen. Für die übrigen Versuchsbalken der Versuchsreihe wurden die Balkenabmessungen mit $d_o = 40$ cm und $b_o = 20$ cm gewählt (Der Querschnitt 20/40 cm entspricht dem Standardquerschnitt im Forschungsprogramm "Erwärmungsvorgänge an balkenartigen Betonbauteilen unter Brandbeanspruchung").

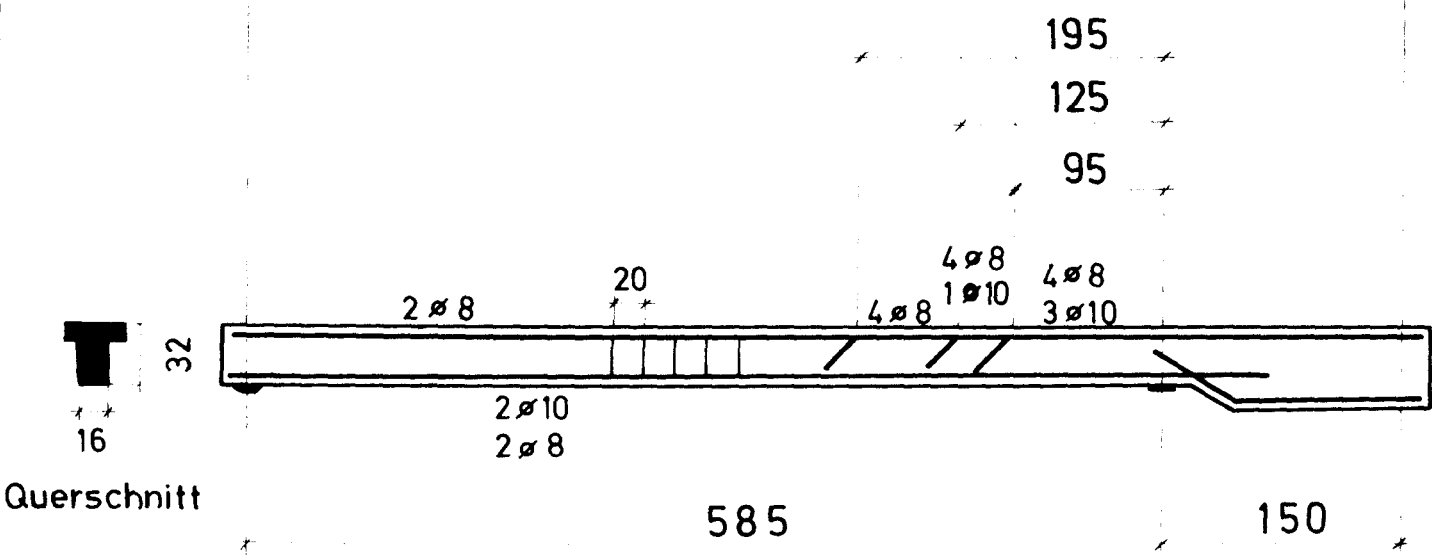
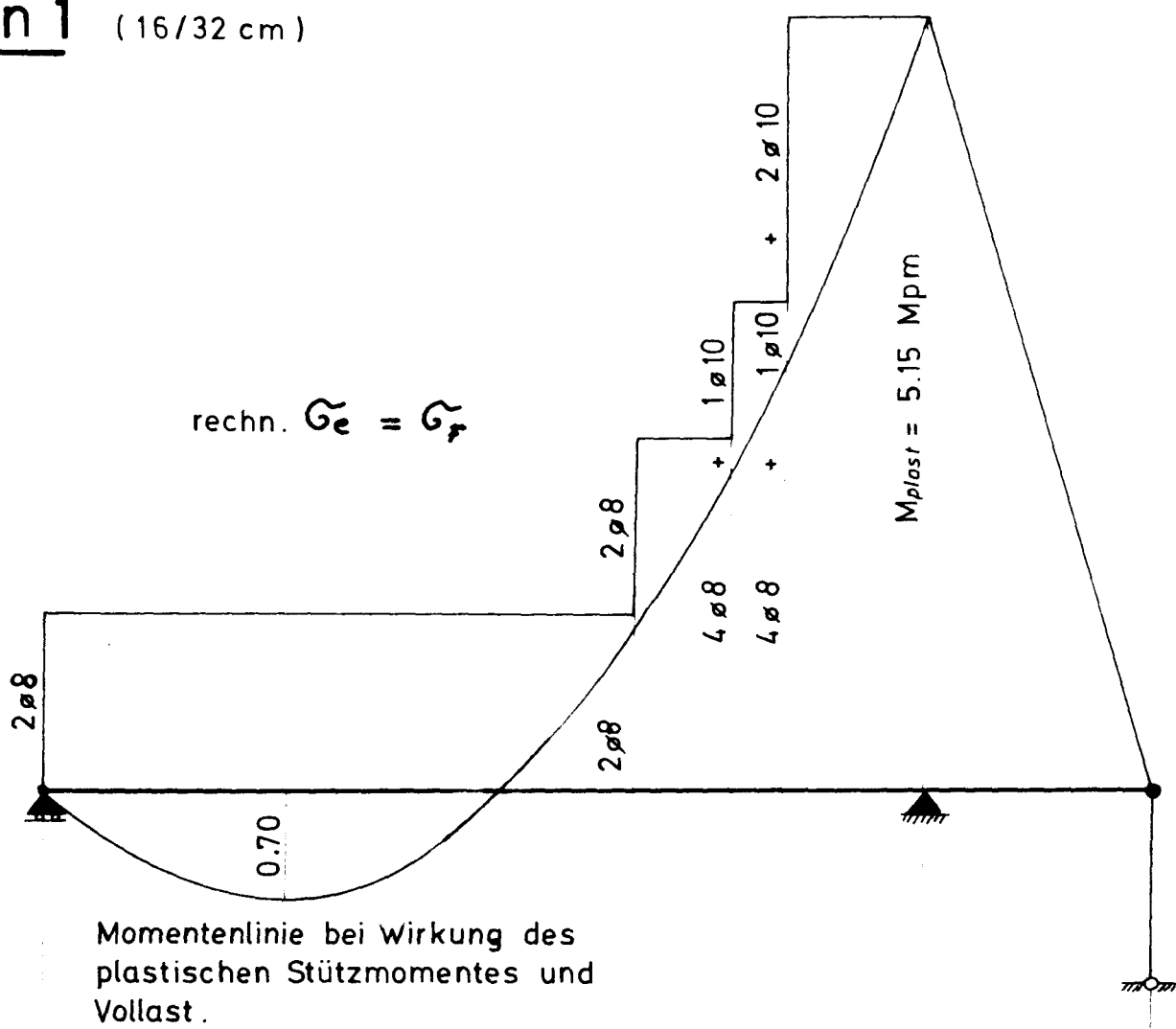
Die Betondeckung der untenliegenden Feldbewehrung betrug in allen Fällen 2,3 cm.

Als statisches System wurde für die Balken 1 bis 4 und 7 der Balken auf zwei Stützen mit einseitiger Einspannung gewählt. Um eine weitgehend volle Einspannung zu erzielen, wurde der an seinem Ende gegen vertikale Verschiebungen gesicherte auskragende kurze Balkenteil möglichst biegesteif ausgebildet. Das Verhältnis der Biegesteifigkeiten zwischen dem der Brandbeanspruchung ausgesetzten Feld ($l_{\text{Feld}} = 5,85$ m) und dem aus dem Brandraum herausragenden Kragarm ($l_{\text{Kr}} = 1,50$ m) betrug in allen Fällen 1:12,5. Diese Versuchsanordnung gestattete es einerseits, das Endfeld eines Durchlaufträgers unter Brandbeanspruchung zu simulieren, andererseits die Änderung der äußeren Schnittkräfte infolge Systemzwängungen über die Versuchszeit zu registrieren.

Der Balken 6 (statisch bestimmt gelagerter Träger) wies eine Stützweite von 4,75 m auf.

Die Bewehrungsführung der einzelnen Versuchsbalken wurde bereits im Abschnitt 1 erläutert; die Bewehrungspläne sind in den Anlagen 2.1 und 2.2 zusammengestellt.

Balken 1 (16/32 cm)

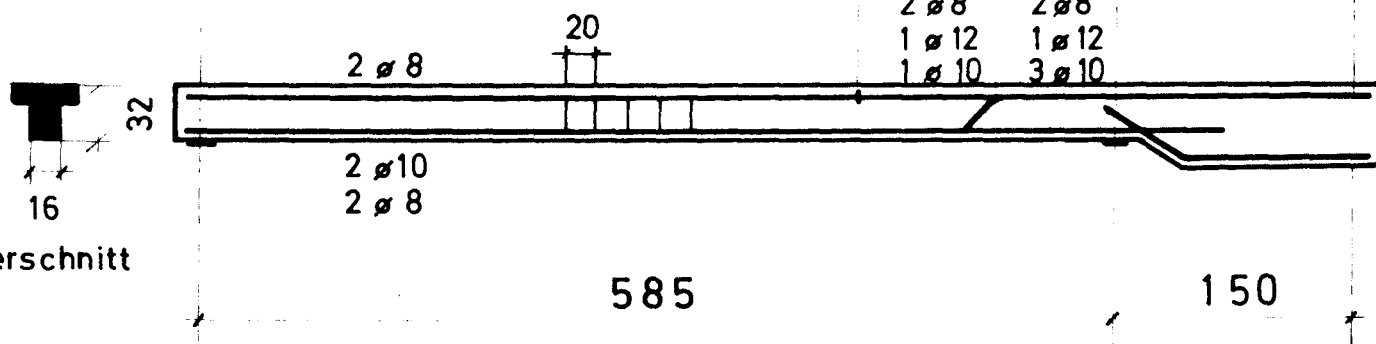
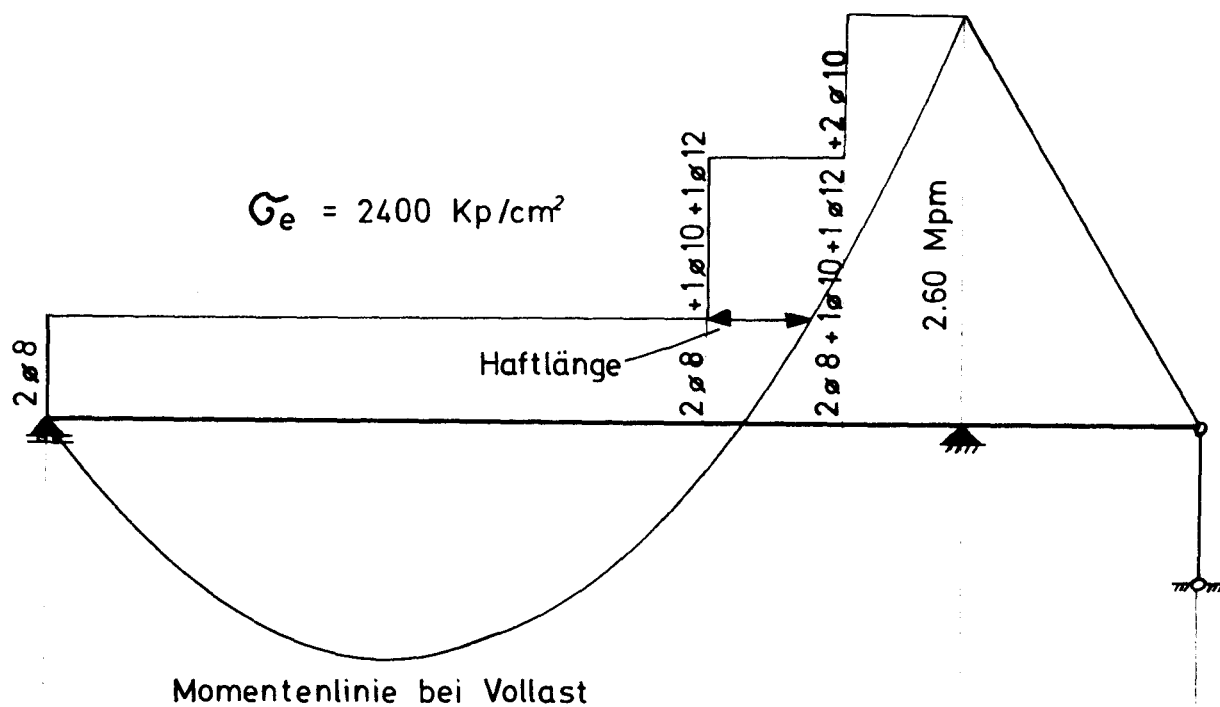


Bewehrungsstaffelung nach dem "plastischen Stützmoment"

oben durchgehende Bewehrung nach DIN 4102
 ($2 \phi 8 \hat{=} 1/3 F_{e, Feld}$)
 ($1 \text{ cm} \hat{=} 0.5 \text{ Mpm}$)

Balken 2 (16/32 cm)

-13-



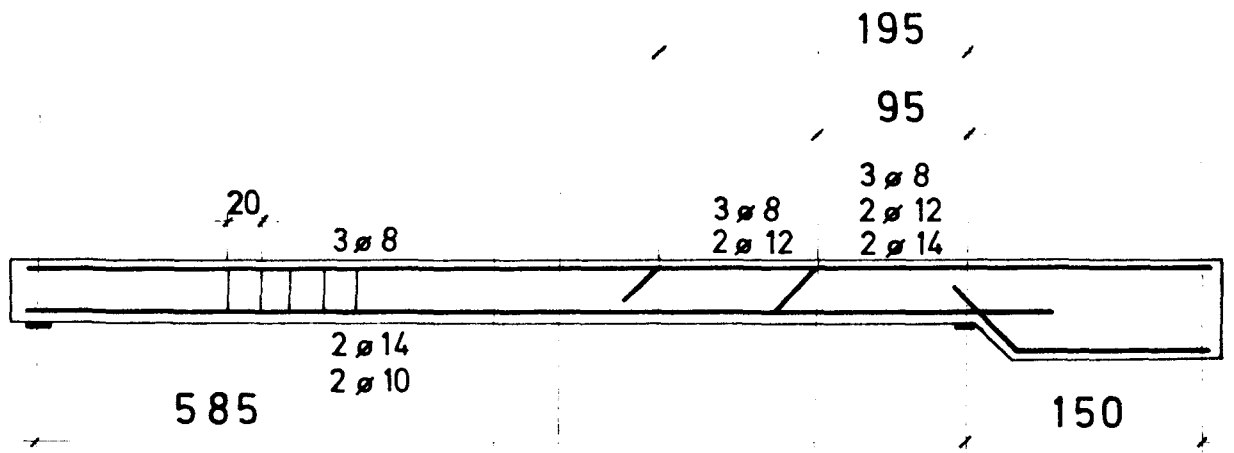
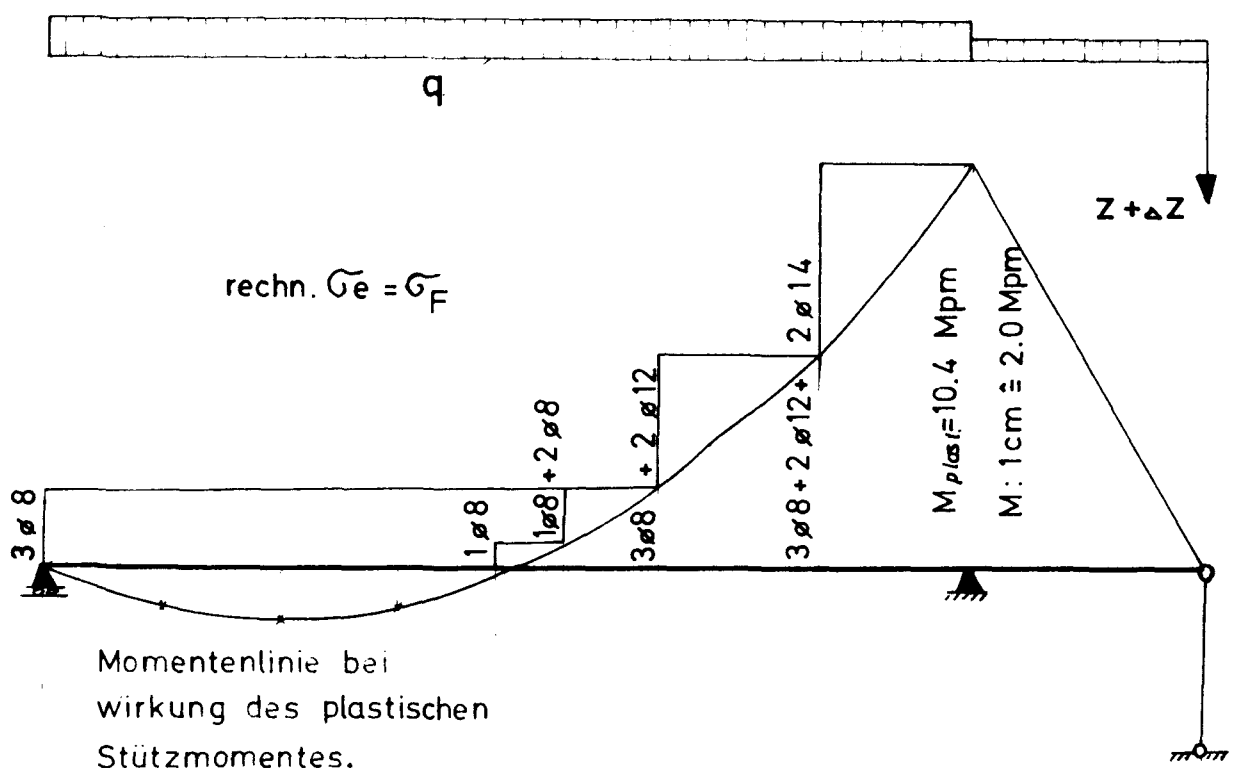
Staffelung der Bewehrung nach den statischen Erfordernissen

Oben durchgehende Bewehrung nach DIN 4102

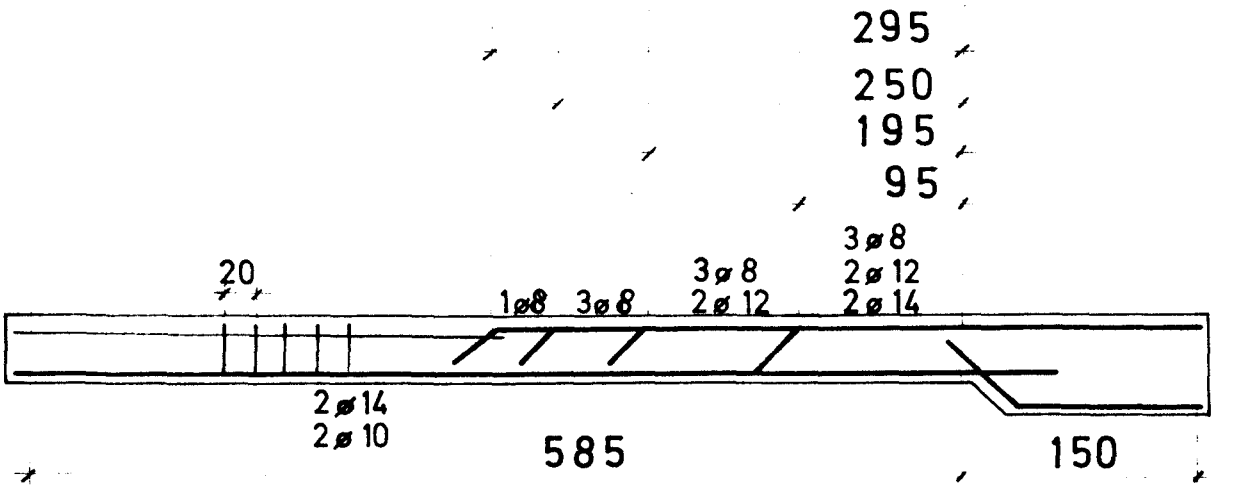
($2 \text{ ø } 8 \hat{=} 1/3 F_{eId}$)

($1 \text{ cm} \hat{=} 0.5 \text{ Mpm}$)

Balken 3 u. 7 (20/40 cm)

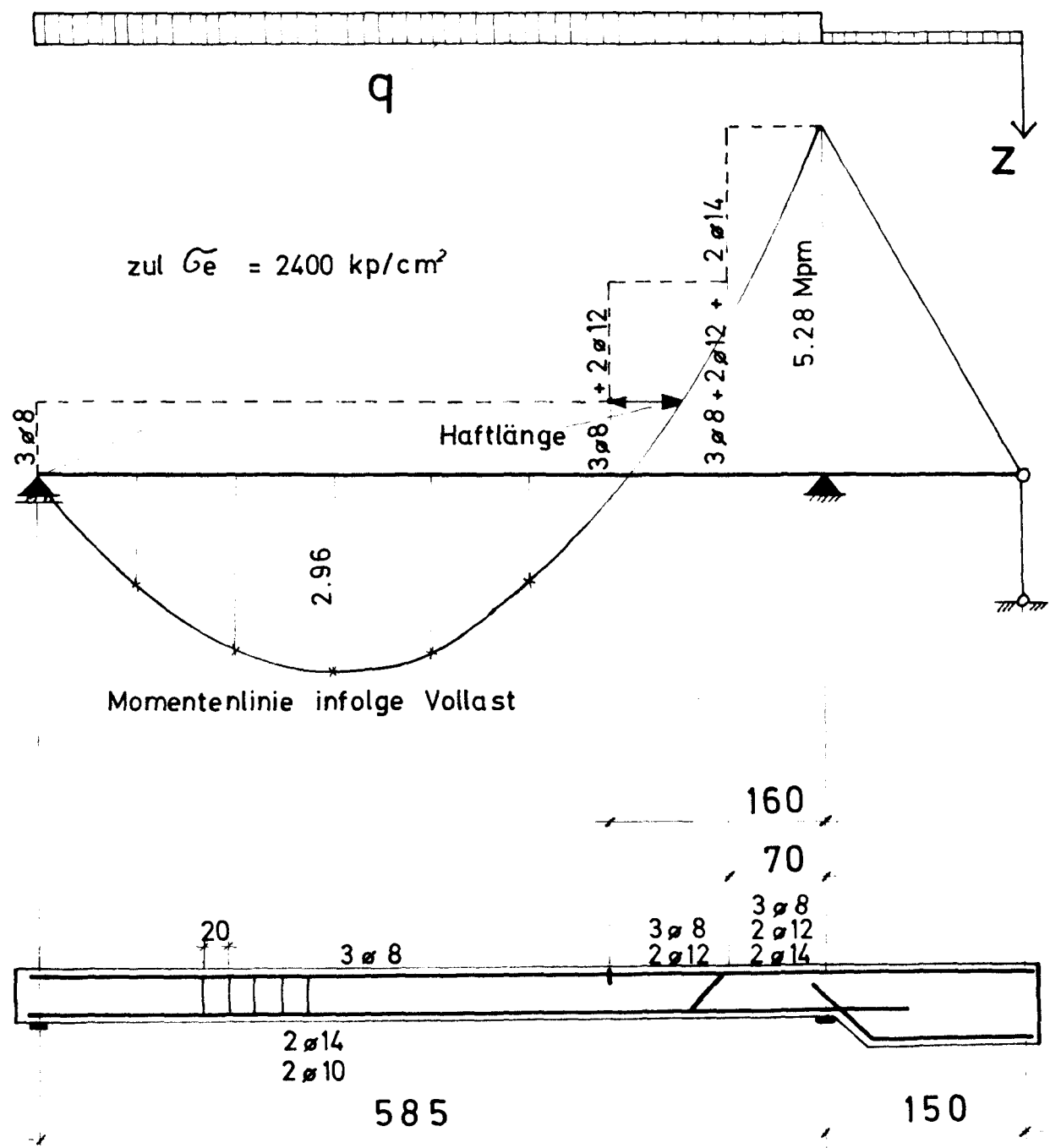


Bewehrungsstaffelung nach dem "plast. Stützmoment"
oben durchgehende Bewehrung 3 ø 8 = 1/2 Fe_{Feld}



Bewehrungsstaffelung nach dem "plast. Stützmoment"
keine oben durchgehende Bewehrung

Balken 4 (20/40 cm)



Staffelung der Bewehrung nach den statischen Erfordernissen

Oben durchgehende Bewehrung nach DIN 4102
 (3 $\varnothing 8 \hat{=} 1/3 F_{e,ld}$)
 (M: 1cm $\hat{=} 1.0$ Mpm)

2.2 Baustoffe

Für alle Versuchsbalken wurde ein Beton mit einer Mindestgüte B 300 verwendet.

Zuschläge: Grubenkies,
Zement PZ 275,
Mischungsverhältnis 1:6,25 nach Gewichtsteilen,
W/Z-Wert = 0,63.

Für vollkommene Frischbetonverdichtung erhält man folgende Anteile:

300 kg Zement/m³,
190 kg Wasser/m³,
1890 kg Zuschlagstoff/m³.

Der Zement (Hersteller Norddeutsche Portland-Cementfabriken AG, Werk Alemannia) hatte eine Normenfestigkeit nach DIN 1164 von $\sim 450 \text{ kp/cm}^2$.

Die Zuschlagstoffe (Firma Riemenschneider, Braunschweig, Grube Watenbüttel) wurden in folgenden Kornabstufungen gewählt:

0 - 3 mm : 40 %
3 - 7 mm : 25 %
7 - 15 mm : 35 %.

Die Kornabstufung entspricht einer Sieblinie im Bereich A₁₅ und B₁₅. Vor jedem Betoniervorgang wurde die Eigenfeuchtigkeit der Zuschlagstoffe durch Trocknung von Proben bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz bestimmt und beim Wasserzusatz berücksichtigt. Die Prüfung der Frischbetonsteife nach DIN 1048 ergab ein Ausbreitmaß von i.M. 39 cm (Konsistenz K2). Druckfestigkeitsprüfungen an Probewürfeln (20 cm Kantenlänge) wurden nach jeweils 28 Tagen Erhärtungszeit und zum Zeitpunkt des Brandversuches durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tafel 2 zusammengestellt.

Tafel 2 Festigkeitswerte und Feuchtigkeitsgehalt des verwendeten Betons

Bezeichnung	Betongüte β_{w28} in kp/cm^2	Zum Zeitpunkt des Brandversuches		
		Alter in Tagen	Druckfestigkeit in kp/cm^2	Feuchtigkeits- gehalt in Gew.-%
1	400	145	430	4,2
2	360	79	410	3,2
3	400	138	430	4,1
4	360	70	410	3,2
7	375	90	410	3,7
6	400	242	440	3,8

+) bezogen auf das Trockengewicht

Der Feuchtigkeitsgehalt wurde an für die einzelnen Bauteile repräsentativen Prüfkörpern bestimmt, aus denen kleinere Betonproben entnommen und bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet wurden.

Die Lagerung der Versuchsbalken wie der Prüfkörper für die Feuchtigkeitsmessungen erfolgte bis zum Zeitpunkt des Brandversuches in einer geschlossenen Halle unter angenähert gleichen klimatischen Bedingungen (Raum-Temperaturen: + 15°C bis + 22°C; relative Luftfeuchte: 60 bis 75 %).

Als Bewehrung aller Versuchskörper wurde Rippentorstahl St III b verwendet.

3. Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau ist in den Anlagen 1.1 und 1.2 sowie auf den Bildern 1 und 2 dargestellt.

3.1 Brandkammer

Die Versuchsbalken 1 bis 4 und 7 wurden in einer Brandkammer mit folgenden Abmessungen untersucht: lichte Länge = 5,00 m, lichte Breite = 4,00 m, Höhe bis UK Versuchsbalken: 1,20 m. Die Beheizung erfolgte mit 8 Ölbrennern unter Verwendung von Heizöl EL nach DIN 51 603, wobei je 4 Brenner an den Brandkammerlängsseiten angeordnet wurden. Die waagerechten Flammenachsen lagen rd. 0,67 m über dem Brandkammerboden und bildeten mit den Prüfbalkenachsen einen rechten Winkel. Die Flammenlänge betrug nach dem Anheizvorgang der ersten Versuchsminuten 0,80 m bis 1,00 m. Die Rauchgase wurden durch zwei Abzüge mit Austrittsöffnungen am Brandkammerboden abgesaugt. Die innere Ausmauerung der Kammerwände und des Bodens bestand aus Hartschamotte-Steinen. Zur oberen Abdeckung des Brandraumes dienten 7,5 cm dicke Ytong-Dachplatten, die einerseits auf den Brandkammer-Längswänden, andererseits auf den Prüfkörpern aufgelagert wurden. Die Fugen zwischen den Dachplatten wurden vermörtelt.

Der statisch bestimmt gelagerte Prüfkörper (Balken 6) wurde in einer 4,00 m langen, 2,40 m breiten und 1,55 m hohen Brandkammer untersucht. Die Beheizung erfolgte hier durch 4 Ölbrenner, die sich paarweise an den Brandhausstirnseiten gegenüberlagen.

3.2 Einbau und Belastung der Versuchsbalken

Die Balken 1 - 4 und 7 wurden in der Weise in den Versuchsstand eingebaut, daß das 5,85 m weit gespannte Feld über eine Länge von 5,00 m der Brandbeanspruchung ausgesetzt werden konnte. Die Auflager lagen außerhalb des Brandraumbereiches und wurden durch besondere Isolierungen vor Temperatureinwirkungen aus der Beheizung geschützt. Der aus einer Brandkammerseite herausragende Kragarm mit verstärktem Querschnitt wurde in 1,50 m Entfernung vom festen Auflager mittels einer Zugstange mit Spannschloß nach unten abgespannt. Mit Hilfe dieser Vorrichtung konnten vor Versuchsbeginn die planmäßigen Schnittkräfte in den Stützquerschnitt eingeleitet und während des Brandversuches deren zeitliche Änderung ständig durch Dehnungsmessungen an der Zugstange registriert werden.

Die äußeren lotrecht wirkenden Lasten wurden durch zwei hydraulische Pressen eingetragen und mittels Lastverteiler in den 4 Achtelpunkten des Feldes eingeleitet (s. Anlagen 4.1 und 4.2). Der Biegemomentenverlauf aus dieser Lastanordnung entspricht in großer Annäherung dem aus einer gleichmäßig verteilten Belastung. Die Pressenlasten wurden in vier Stufen bis zum Sollwert gesteigert. In gleichen Laststufen wurde das Stützmoment über dem festen Auflager durch Anziehen des Spannschlusses eingetragen. Kontrollmessungen erfolgten durch Dehnungsmessung an der Zugstange und mit Hilfe einer Kraftmeßdose, die unterhalb des Widerlagers für die Abspanneinrichtung (Hallenboden) angebracht wurde (s. Anlage 1.1).

Die Bemessung und Belastung der Versuchsbalken erfolgte wie für einen Balken auf drei Stützen mit gleichen Feldweiten und gleichmäßig verteilter Belastung. Über dem festen Auflager wurde ein negatives Biegemoment mit dem Betrage $\frac{q \cdot l^2}{8}$ erzeugt. Das im Felde wirksame positive Biegemoment ergab sich damit geringfügig kleiner als das rechnerische Bemessungsmoment. In der folgenden

Tafel 3 sind die eingetragenen und die zulässigen rechnerischen Biegemomente gegenübergestellt.

Tafel 3 Eingetragene und zulässige Biegemomente in den Versuchsbalken

Bez.	b_o/d_o (cm)	h (cm)	festes Auflager		Feld	
			zul.M(Mpm)	vorh.M(Mpm)	zul.M(Mpm)	vorh.M(Mpm)
1	16/32	29	- 2,60	- 2,60	+ 1,70	+ 1,48
2	16/32	29	- 2,60	- 2,60	+ 1,70	+ 1,48
3	20/40	37	- 5,28	- 5,28	+ 3,64	+ 2,96
4	20/40	37	- 5,28	- 5,28	+ 3,64	+ 2,96
7	20/40	37	- 5,28	- 5,28	+ 3,64	+ 2,96

Der Balken 6 wurde bei statisch bestimmter Lagerung geprüft. Die Pressenlasten wurden in den vier Achtelpunkten aufgebracht und so bemessen, daß in Feldmitte das halbe zulässige Biegemoment wirkte.

$$\text{zul. } M = + 4,85 \text{ Mpm; vorh. } M = + 2,44 \text{ Mpm.}$$

Hierdurch sollten am statisch bestimmt gelagerten Balken Beanspruchungen in einer Größe simuliert werden, wie sie im Felde eines brandbeanspruchten Durchlaufbalkens auftreten, wenn die Stützmomente durch äußere Zwängungen erhöht werden.

Die festen Balkenauflager aller Versuchsbalken wurden als Linienkipplager, die beweglichen als Rollenlager mittels Stahlrolle $\varnothing 24$ mm zwischen zwei geschlichteten Stahlplatten ausgebildet.

3.3 Beheizung

Zur Beheizung des Brandraumes dienten die im Abschnitt 3.1 genannten Ölbrenneranordnungen. Die Temperatursteigerung im Brandraum erfolgte nach der Einheitstemperaturkurve in DIN 4102 Blatt 2, Ausgabe 1965.

3.4 Messungen während der Brandversuche

3.4.1 Temperaturen im Brandraum

Die Temperaturen im Brandraum wurden mit insgesamt 8 NiCr-Ni-Thermoelementen (nach DIN 43 732) gemessen. Die Lage der Meßstellen ist in den Anlagen 1.1 und 1.2 aufgetragen. Die Meßergebnisse wurden über Kompensographen registriert; gleichzeitig erfolgte nach diesen Messungen die Steuerung der Brenner.

3.4.2 Temperaturen in den Versuchsbalken

Bei allen statisch unbestimmt gelagerten Bauteilen wurden Temperaturmeßstellen über dem festen Auflager an der obenliegenden Stützbewehrung sowie in Feldmitte an der oben- und untenliegenden Bewehrung vorgesehen. Der statisch bestimmt gelagerte Prüfkörper (Balken 6) wurde in Feldmitte mit Meßstellen an der oben- und untenliegenden Längsbewehrung ausgestattet. Die Lage der Meßquerschnitte und einzelner Meßstellen ist in den Anlagen 3.1 bis 3.6 dargestellt. Als Thermoelemente dienten Fe-Konst.-Drahtpaare mit 0,5 mm Drahtdurchmesser, deren Warmlötstellen an der Oberfläche der Bewehrungsstäbe unschieblich befestigt wurden. Zur Registrierung wurden selbstkompensierende Schreiber benutzt.

3.4.3 Zugkräfte an der Abspanneinrichtung

Die Abspanneinrichtung der Kragarme für die statisch unbestimmt gelagerten Balken ist in den Anlagen 1.1 und 1.2, sowie in den Bildern 1 und 2 dargestellt. Sie wurde im Abstand von 1,50 m vom festen Auflager an dem aus dem Brandraum herausragenden Balkenende angeordnet und aus Traversen und Zugstangen zusammengesetzt.

Die auftretenden Kräfte wurden durch ein oberes und unteres Traversen- und Zugstangenpaar in den Balken bzw. das untere Widerlager gelenkig eingeleitet. An der mittleren Zugstange wurden die Kräftemessungen in einem Meßbereich mit verringertem Querschnitt vorgenommen. Hierfür wurde ein Spannstahl St 80/105 Ø 22 gewählt. Die Einleitung der planmäßigen Schnittkräfte im Stützquerschnitt erfolgte durch Anziehen der Schraubenmuttern am oberen Zugstangenpaar, wodurch Verdrehungen aus Gewindereibungen im Meßstab vermieden werden konnten. Zur Dehnungsmessung am Meßstab dienten zwei induktive Geber und ein Klemmdehnungsmesser.

Gemessen wurden die Dehnungen infolge der vor den Versuchen planmäßig auf-
gebrachten Kräfte zur Erzeugung der Stützmomente und die Dehnungen infolge
der Änderung der Biegemomente aus Systemzwängungen während der Brandbean-
spruchung.

Zur zusätzlichen Kontrolle der vor den Brandversuchen durch die Abspann-
einrichtung eingeleiteten Stützmomente wurde die unterhalb des unteren
Widerlagers angeordnete Kraftmeßdose abgelesen.

3.4.4 Dehnungen an der Bewehrung

An den obenliegenden Bewehrungen der Stützquerschnitte aller statisch unbe-
stimmt gelagerten Balken und an den obenliegenden Feldbewehrungen in den
Feldmitten wurden Dehnungsmessungen mittels Setzdehnungsmessern durchgeführt.
Die Meßlänge betrug 200 mm. Die erforderlichen Meßmarken waren vor dem
Betonieren der Versuchskörper mit einem Zweikomponenten-Kleber an der Ober-
seite der Bewehrungsstäbe befestigt und durch Kunststoffhülsen ausgespart
worden. An jeder Dehnungsmeßstelle befand sich zwecks Temperaturkompensation
eine Temperaturmeßstelle zwischen beiden Meßmarken am Stahl.

Die genaue Lage der Meßstellen ist in den Anlagen 5.1 bis 5.6 angegeben.

Im Stützquerschnitt wurden die Dehnungen der Bewehrung aus dem vor dem
Brandversuch aufgebrachten Stützmoment kontrolliert und während der Brand-
belastung die Beanspruchungen aus den Systemzwängungen aufgenommen. An den
in den Feldmitten der Balken befindlichen Marken konnten die Messungen nur
während der ersten 30 bis 40 Minuten Brandbeanspruchung wegen der zunehmenden
Wasser- und Dampfaustritte auf der Balkenoberseite sowie der steigenden Tempe-
raturen durchgeführt werden.

3.4.5 Verformungen

Folgende Verformungen wurden an den Versuchsbalken gemessen:

1. lotrechte Durchbiegungen,
2. Längenänderungen,
3. Verdrehung des Endquerschnittes am beweglichen Auflager.

Zur Kontrolle von Durchbiegungen des Kragarmes und gegebenenfalls vorhandener Verdrehungen des Stützquerschnittes wurden zusätzliche Meßgeräte angeordnet.

Beim statisch bestimmt gelagerten Versuchsbalken wurden lediglich die Durchbiegungen registriert.

Die Lage der einzelnen Meßstellen geht aus den Anlagen 6.1 bis 6.6 hervor. Die Verformungsmessungen erfolgten mittels Rollen-Geräten mit einer Ablesegenauigkeit von 1/10 mm. Die Anschluß-Stahladrähte dieser Meßgeräte wurden vor direkter Hitzeeinwirkung geschützt.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Meßwerte

4.1.1 Temperaturen im Brandraum

Die gemessenen Brandraumtemperaturen wurden als Mittelwerte aus acht vorhandenen Meßstellen ausgewertet und zusammen mit der Sollkurve in den Anlagen 3.1 bis 3.6 aufgetragen.

4.1.2 Temperaturen im Bauteil

Die registrierten Temperaturen an den Bewehrungsstäben der Balken sind als Temperatur-Zeit-Kurven in den Anlagen 3.1 bis 3.6 dargestellt. Im Vergleich mit anderen umfangreichen Untersuchungen über Erwärmungsvorgänge an Stahlbetonbauteilen ergeben sich hier keine außerhalb des üblichen Streubereiches liegende Abweichungen. Die Temperaturen der untenliegenden Feldbewehrungen zum Zeitpunkt des Versagens der Bauteile sind in Tafel 5 (vergl. Pkt. 4.3) zusammengestellt.

4.1.3 Zugkräfte an der Abspanneinrichtung

Aus den über Dehnungsmessungen an der Zugstange der Abspanneinrichtung ermittelten Kräften können direkt die Biegemomente im Stützquerschnitt bestimmt werden. Die Ergebnisse dieser Auswertungen sind in den Anlagen 4.1 und 4.2 als Biegemomente über der Versuchszeit aufgetragen. Es wurden hierbei ledig-

lich die infolge Brandbeanspruchung auftretende Änderung der Stützmomente dargestellt. Die gesamte Biegebeanspruchung im Stützquerschnitt setzt sich daher aus dem planmäßig vor Brandangriff aufgebrauchten Stützmoment und dem aus Temperatur-Systemzwängungen resultierenden Moment zusammen.

Nach Näherungsberechnungen ergeben sich für die vorliegenden Stützquerschnitte bei Annahme einer parabolischen Beton-Druckspannungsverteilung mit $\max \epsilon_B = 3 \text{ ‰}$ und unter Voraussetzung ausreichender Rotationsfähigkeiten folgende aufnehmbaren plastischen Biegemomente:

Querschnitt $b_o/d_o = 16/32 \text{ cm} : M_{pl} \approx 5,2 \text{ Mpm (Balken 1 u. 2)}$

Querschnitt $b_o/d_o = 20/40 \text{ cm} : M_{pl} \approx 10,4 \text{ Mpm (Balken 3, 4 u. 7)}$

Bei den Balken 3 und 7 ($b_o/d_o = 20/40$; nach dem plastischen Moment gestaffelte Stützbewehrung) ergaben sich stetige Änderungen der Stützmomente über die Zeit. Die Stützmomente vergrößerten sich bis zum Versuchsende und erreichten hier die Größe des rechnerischen plastischen Momentes (vorh. $M \approx 10,3$ bzw. $10,6 \text{ Mpm}$). Das Versagen beider Balken trat nach 123 bzw. 113 min Versuchsdauer mit stark zunehmenden Verformungen im Felde ein.

Die Momenten-Zeit-Kurve des Balkens 4 ($b_o/d_o = 20/40 \text{ cm}$, nach dem zulässigen Stützmoment - Gebrauchsstand - gestaffelte Bewehrung) zeigt einen abweichenden Verlauf: Das Größtmoment betrug nur $\Sigma M = 5,28 + 2,67 = 7,95 < 10,4 \text{ Mpm}$ und wurde bereits nach 30 min Versuchsdauer erreicht. Bis zum Versagen des Bauteiles in der 88. Versuchsminute wurde eine ständige Abnahme des Biegemomentes beobachtet. Das Versagen erfolgte durch Bruch im Stützbereich ($\approx 1,60 \text{ m}$ Abstand vom festen Auflager) infolge Reißens und Schlupf der obenliegenden Bewehrung (3 $\emptyset 8 \text{ St III b}$).

Bei Balken 1 ($b_o/d_o = 16/32 \text{ cm}$; nach dem plastischen Moment gestaffelte Bewehrung) wurde eine ständige Zunahme des Stützmomentes bis zur 90. Versuchsminute registriert; der Anstieg von der 30. bis zur 90. Versuchsminute war jedoch wesentlich geringer als vergleichsweise bei Balken 3 und 7. Das maximale Stützmoment erreichte nicht ganz das rechnerische plastische Moment ($\max. M = 4,54 \text{ Mpm} < 5,2 \text{ Mpm}$). Vermutlich liegt die Ursache in der geringen Biegesteifigkeit des Systems, so daß unter Berücksichtigung des maximalen

Zwängungsmomentes das Gesamtmoment unter dem plastischen bleibt. - Das Versagen des Balkens erfolgte nach 111 min Versuchsdauer mit schneller Zunahme der Durchbiegungen im Feld.

Das Momenten-Zeit-Diagramm des Balkens 2 ($b_o/d_o = 16/32$ cm; nach dem zulässigen Stützmoment - Gebrauchsstand - gestaffelte Bewehrung) zeigt einen ähnlichen Verlauf wie das für Balken 4. Das Momenten-Maximum wurde nach etwa 40 min Versuchsdauer erreicht ($\max. M = 2,60 + 1,76 = 4,36 < 5,20$ Mpm); danach wurde bis zum Versagen des Balkens in der 69. Versuchsminute eine geringe Abnahme registriert. Das Versagen erfolgte durch Reißen der obenliegenden Bewehrung (2 \emptyset 8 St III b) in etwa 1,60 m Abstand vom festen Auflager.

4.1.4 Dehnungen der Bewehrung

Die Ergebnisse der Dehnungsmessungen an der Bewehrung sind in den Anlagen 5.1 bis 5.6 graphisch aufgetragen. Neben den gemessenen Absolutwerten der Längenänderungen sind die unter Berücksichtigung der Temperaturdehnungen errechneten Lastdehnungen und schließlich die mit Hilfe des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes des verwendeten Stahles ermittelten Stahlspannungen angegeben.

Übereinstimmend mit den unter Pkt. 4.1.3 berichteten Ergebnissen zeigte sich, daß die Bewehrung über dem festen Auflager der Balken 3 und 7 über den Proportionalitätsbereich hinaus beansprucht wurde. Die größte gemessene Dehnung der Stützbewehrung (Balken 1) betrug 2,2 ‰ ($\sigma = 3,75 \text{ Mp/cm}^2$). Bei den Balken 2 und 4 betrug die maximale Dehnung der obenliegenden Stützbewehrung nicht mehr als $\epsilon = 1,65$ ‰ ($\sigma = 3,4 \text{ Mp/cm}^2$).

An den obenliegenden Feldbewehrungen der Durchlaufsysteme (Balken 1, 2, 3 und 4) wurden nach 30 - 40 min Brandbeanspruchung nach Abzug der Temperaturdehnungen positive Dehnungen von i.M. 1,8 bis 2,5 ‰ ($\sigma = 3,4$ bis 4 Mp/cm^2) gemessen.

Die obenliegende Bewehrung des statisch bestimmt gelagerten Balkens (Balken 6) wies in Feldmitte nach 30 min Versuchsdauer unter Kompensierung der Temperaturdehnungen eine positive Dehnung von i.M. rd. 1,0 ‰ auf. Hieraus ergibt sich

ein günstig wirkendes negatives inneres Moment aus Wirkungen eines Eigenspannungszustandes.

Ein quantitativer Einfluß auf die Feuerwiderstandsdauer kann aus dem Versuchsergebnis nicht abgeleitet werden.

4.1.5 Verformungen der Versuchskörper

In den Anlagen 6.1 bis 6.6 sind die Ergebnisse der Verformungsmessungen aufgetragen.

Durch Differenzen- und Mittelbildung der Ablesungen an den Meßstellen 4 und 5 konnten sowohl die Längenänderungen der Mittellinie der Balken ($\frac{d}{2}$) als auch die Verdrehung des Auflagerquerschnittes ausreichend genau bestimmt werden. Die Kontrollmessungen am festen Auflager ergaben, daß hier keine nennenswerten Verschiebungen und Verdrehungen aufgetreten sind.

Folgende Durchschnittswerte der Längenänderungen der Balkenmittellinien ergeben sich für eine Branddauer von 60 min:

$$\text{Balken } b_o/d_o = 20/40 \text{ cm} : 5 \text{ mm/m}$$

$$\text{Balken } b_o/d_o = 16/32 \text{ cm} : 6 \text{ mm/m.}$$

4.2 Sonstige Beobachtungen

In Tafel 4 sind alle über das Meßprogramm hinaus gemachten wichtigen Beobachtungen zusammengestellt.

Tafel 4 Zusammenstellung der während der Brandversuche gemachten Beobachtungen

Beobachtungen	Bezeichnung der Balken					
	1	2	3	4	7	6
Wasseraustritte auf den dem Feuer zugekehrten Balkenseiten bei Versuchsminute	14	-	12	-	5	-
Beginn von Wasseraustritten auf der dem Feuer abgekehrten Balkenseite bei Versuchsmin.	11	10	11	12	10	13
Erste Querrisse auf der dem Feuer abgekehrten Balkenseite auf der gesamten Balkenlänge (vergl. Bilder 3 - 7) bei Versuchsminute	8	8	11	12	8	13
Rückgang des Feuchtigkeitsaustrittes auf der dem Feuer abgekehrten Balkenseite bei Versuchsminute	45	40	-	60	42	42
Beginn der Verengung der Risse auf der dem Feuer abgekehrten Balkenseite im Feldbereich bei Versuchsminute	75	60	90	-	95	55
Erste erkennbare Biegerisse an der Balkenunterkante im Feldbereich bei Versuchsminute	85	65	92	-	90	82
Versuchsende Versuchsminute	111	69 (Bruch)	123	88 (Bruch)	113	94

4.3 Zusammenfassung wichtiger Versuchsdaten

Tafel 5

Bezeichnung der Balken	b _o (cm)	d _o (cm)	Versuchsdauer in min	Art des Versagens	Mittlere Temperatur der untenliegenden Bewehrung bei Ver- suchsende in °C
1	16	32	111	Rasche Zunahme der Durchbiegung im Feld.	830
2	16	32	69	Bruch der oben- liegenden Be- wehrung.	660
3	20	40	123	Rasche Zunahme der Durchbiegung im Feld.	820
4	20	40	88	Bruch der oben- liegenden Be- wehrung.	670
7	20	40	113	Rasche Zunahme der Durchbiegung im Feld.	810
6	20	40	94	Rasche Zunahme der Durchbiegung.	600

5. Zusammenfassung und Deutung der Versuche

Es wird über Versuche an Durchlaufträgern unter Benutzung vereinfachter Systeme berichtet. Die gewählte Versuchsanordnung bestand aus Einfeldträgern mit einseitiger Auskragung, die über eine Zugstange abgefangen wurde und eine Verformungsbehinderung des Traggliedes wie bei einem in beiden Feldern beheizten Zweifeldträger oder einem einseitig eingespannten Einfeldträger zu simulieren gestattete. Über die Zugstange konnten die Zwängungskräfte im System registriert werden.

Eine erste Versuchsreihe, deren Ergebnisse Grundlage für die hier beschriebenen Versuche bildete, umfaßte Balken und Platten mit einer relativ geringen Stützweite von 2,50 m. Die Vorversuche zeigten den wesentlichen Einfluß der System-

zwängungszustände auf die Feuerwiderstandsdauer. Die erreichten Feuerwiderstandsdauern waren derart groß, daß das günstige Tragverhalten z.T. mit Hilfe eines querschnittsabhängigen Eigenspannungszustandes zu deuten versucht wurde.

In den vorliegenden Fortsetzungsversuchen sollten durch Vergrößerung der Stützweite ($l_{\text{Feld}} = 5,85 \text{ m}$ und Kragarmlänge $l_{\text{Kr}} = 1,50 \text{ m}$) sowie Variationen der Querschnittsabmessungen diese Phänomene näher studiert werden. Daneben sollten aufgrund der Ergebnisse der ersten Untersuchungen eine geeignete Bemessung des Stützquerschnittes und geeignete konstruktive Anordnungen der Bewehrungen überprüft werden.

Bei Versuchsbalken 1 bis 4 der Untersuchungsreihe wurden die obenliegenden Bewehrungen hinter dem Bereich der erforderlichen Momentendeckung mit $1/3 f_{\text{t,Feld}}$ bis zum Balkenende durchgezogen. (Vergl. Anforderung für Durchlaufkonstruktionen nach DIN 4102 ohne ausreichende Brandschutzmaßnahmen im Feld). Bei Versuchsbalken 7 wurde auf eine zusätzliche Bewehrung für den Balkenrandbereich verzichtet. Die Bewehrungsführung im Stützbereich wurde nach dem Verlauf des plastischen Momentes oder des Gebrauchsmomentes ausgelegt.

Zusammenfassend ergeben sich folgende charakteristische Versuchsergebnisse:

Innerhalb der ersten 30 Minuten Brandbeanspruchungszeit wurde ein temperaturbedingtes Zwängungsmoment (negatives Stützmoment) aufgebaut, das die Größe des plastischen Momentes erreichen kann. Dieses Zwängungsmoment bestimmt entscheidend unter gewissen Veränderungen seiner Größe den Kräftezustand des Systems bis zum Versagen. In allen Fällen, in denen die Stützbewehrung nach dem plastischen Moment gestaffelt worden ist, wurde das rechnerische plastische Moment oder das max. Zwängungsmoment voll bzw. in großer Näherung erreicht. In den Fällen einer Bemessung und Bewehrungsführung nach dem Gebrauchszustand konnte das plastische Moment nicht in voller Größe registriert werden.

Für alle Fälle einer Bewehrungsstaffelung nach dem plastischen Moment ergab sich eine Feuerwiderstandsdauer zwischen 110 und 120 Minuten. Bei einer Bewehrungsführung nach dem Gebrauchszustand erfolgte das Versagen bei Balken 16/32 cm nach 70 Minuten, bei Balken 20/40 cm mit entsprechender Bewehrungsführung nach 88 Minuten. In beiden letztgenannten Fällen trat das Versagen durch einen schubbruchartigen Bruch, der durch einen vom Ende der gestaffelten Stützbewehrung

ausgehenden Schrägriß eingeleitet wurde, mit stark klaffendem Querschnitt auf. Hierbei riß die durchgehende obenliegende konstruktive Bewehrung. Das Versagen in allen anderen Fällen erfolgte durch eine allmähliche Erschöpfung der Tragfähigkeit mit gleichzeitiger Momentenumlagerung zugunsten des Stützmomentes. Wird die Momententragfähigkeit des Stützquerschnittes erschöpft, tritt das Versagen des Traggliedes unter rascher Zunahme der Durchbiegung ein.

Das vorzeitige Versagen der Balken mit Bewehrungsführungen nach dem Gebrauchszustand ist auf einen starken Sprung in der Momentendeckungslinie des Stützmomentes bei Berücksichtigung des Zwängungsmomentes sowie auf nicht ausreichenden Verbund unter der vorliegenden erhöhten Beanspruchung zurückzuführen. Die Bewehrungsenden der Stützbewehrung wurden in beiden Fällen mit den rechnerisch erforderlichen Haftlängen angeordnet, sie zeigten aber bei Versagen Bewehrungsschlupf. Als weitere Einflußgröße auf den Verbund kann die unterschiedliche Durchbiegung bzw. Querschnittsspreizung angesehen werden. Der Balken mit Querschnitt 16/32 cm zeigte rd. 45 % höhere Durchbiegungen als der Balken mit Querschnitt 20/40 cm. Dieses Ergebnis beruht im wesentlichen auf den unterschiedlichen Quotienten $\Delta T/h$, wobei ΔT die mittlere Temperaturdifferenz zwischen oberer und unterer Faser des Querschnittes und h die Konstruktionshöhe darstellen.

Aus größeren Querschnittsspreizungen ergeben sich höhere Verbundbeanspruchungen, so daß hierdurch das frühere Versagen des Balkens 16/32 cm gegenüber Balken 20/40 cm gedeutet werden kann.

Die Ergebnisse zeigen, daß der konstruktiven Ausbildung und insbesondere einem ausreichenden Verbund der obenliegenden Bewehrungen große Bedeutung zukommen. Eine Staffelung der Bewehrung nach dem plastischen Stützmoment erscheint erforderlich, da das Zwängungsmoment gegen das plastische Moment strebt. Die erreichten Feuerwiderstandsdauern zeigen, daß der Stützbewehrungsquerschnitt lediglich nach dem Gebrauchszustand ausgelegt zu werden braucht. Auf ausreichende Verankerungen der Bewehrungen muß besonders geachtet werden; hierbei sind Stäbe kleiner Durchmesser Stäben größerer Durchmesser vorzuziehen.

Bei Balken 7 wurde auf eine Anordnung von $1/3 F_{e, Feld}$ als durchlaufende obere Bewehrung verzichtet; die erreichte Feuerwiderstandsdauer lag gering unter der des Balkens 3 (gleiche Führung der Stützbewehrung mit Anordnung von $1/3 F_{e, Feld}$ im

Balkenendbereich). Es kann nicht sicher entschieden werden, ob diese Differenz auf die Abweichungen der Bewehrungen zurückgeführt werden kann. Da in der Praxis aus konstruktiven Gründen stets eine leichte, durchgehende obere Bewehrung eingelegt wird, die in der Regel wesentlich kleiner als $1/3 \cdot Fe_{Feld}$ ist (worauf jedoch bei Balken 7 gänzlich verzichtet wurde), erscheint insgesamt die Forderung nach Anordnung von $1/3 \cdot Fe_{Feld}$ nicht mehr zwingend. Das Tragverhalten der untersuchten Durchlaufträger läßt vielmehr eine Vorschrift hinsichtlich der Staffelung der Stützbewehrung als notwendig erscheinen. Ein bestimmtes Verhältnis der durchlaufenden oberen Bewehrung zur untenliegenden Feldbewehrung sollte nicht mehr vorgeschrieben werden, wenn an den bisherigen konstruktiven Gepflogenheiten festgehalten wird.

Der Einfluß eines querschnittsabhängigen Eigenspannungszustandes auf eine Erhöhung der Feuerwiderstandsdauer - wie er zur Deutung der Ergebnisse der ersten Versuchsreihe wurde - konnte hier (erhebliche Vergrößerung der Stützweiten!) nicht bestätigt werden.

Anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse sollten wenigstens drei Bestätigungsversuche an vollständigen Durchlaufsystemen durchgeführt werden: Als unmittelbarer Anschlußversuch sollte ein Zweifeldträger mit Beheizung in beiden Feldern gewählt werden. Daneben wird die Untersuchung eines Zweifeldträgers mit einfeldiger Beheizung sowie eines Zweifeldträgers mit zusätzlichen Verformungsbehinderungen der Endquerschnitte über Kragarme zur Simulation eines mehrfeldrigen Durchlaufträgers mit Beheizung in allen Feldern vorgeschlagen.

Teil B

6. Allgemeines, Zweck der Untersuchungen, Versuchsprogramm

Die erforderlichen Mittel zur Durchführung der Anschlußversuche wurden im Februar 1969 vom Ministerium für Wohnungsbau und öffentliche Arbeiten des Landes Nordrhein-Westfalen bewilligt. Sie beliefen sich auf DM 15.000,--

Daraufhin wurden die unter Teil A, Punkt 5., vorgeschlagenen Versuche durchgeführt, die darauf abzielten, die in den vorangegangenen Untersuchungen, bei denen jeweils ein belastetes und beheiztes Feld des gedachten Zweifeldsystems simuliert wurde durch einen unbeheizten Kragarm mit Abspannung am Ende, erreichten günstigen Ergebnisse zu bestätigen.

Es wurden drei Balken untersucht:

- I. Zweifeldsystem, belastet mit $g+p$, beide Felder beheizt;
- II. Zweifeldsystem, belastet in Feld 1 mit g , in Feld 2 mit $g+p$, nur Feld 2 beheizt;
- III. Vierfeldsystem, beide Endfelder simuliert durch Kragarme mit Abspannung am Ende, belastet in den Endfeldern mit g , in den Mittelfeldern mit $g+p$, beide Mittelfelder beheizt.

7. Beschreibung der Versuchsbalken

7.1 Querschnitte und statisches System

Es wurde der Betonquerschnitt des Plattenbalkens, der schon in einem Teil der vorangegangenen Versuche gewählt worden war, beibehalten. Die Abmessungen betrugen:

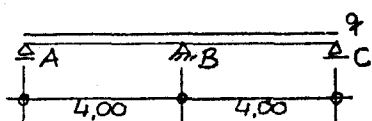
$$\begin{aligned}b_o &= 20 \text{ cm} \\b &= 40 \text{ cm} \\d_o &= 40 \text{ cm} \\d &= 10 \text{ cm.}\end{aligned}$$

Für die simulierten Außenfelder (Kragarme) des Balkens III wurde, entsprechend den vorangegangenen Versuchen, gewählt:

$$\begin{aligned} b_o &= 20 \text{ cm} \\ b &= 40 \text{ cm} \\ d_o &= 60 \text{ cm} \\ d &= 10 \text{ cm.} \end{aligned}$$

7.1.1 Balken I

Statisches System:



Zweifeldträger

$$l_1 = l_2 = 4,00 \text{ m}$$

Gebrauchslasten:

Die Gebrauchslasten wurden so angesetzt, daß der Stützquerschnitt mit den zulässigen Spannungen ausgenutzt wurde.

$$q_1 = q_2 = 2,64 \text{ Mp/m}$$

Schnittgrößen:

$$\begin{aligned} M_1 = M_2 &= 0,070 q l^2 &= 2,96 \text{ Mpm} \\ M_B &= -0,125 q l^2 &= -5,28 \text{ Mpm} \\ A = C &= 0,375 q l &= 3,96 \text{ Mp} \\ B &= 1,25 q l &= 13,20 \text{ Mp} \end{aligned}$$

Es wurde bewußt darauf verzichtet, den für die Feldmomente bei Gebrauchsbemessung maßgebenden Lastfall zu berücksichtigen, um die untenliegende Bewehrung möglichst mit zul σ auszunutzen.

Bemessung:

B 300 / St III b; zul $\sigma = 90(110)/2400$

$$b_o/d_o/h = 20/40/37; b/d = 40/10$$

Felder: $M = 2,96 \text{ Mpm}$

$$k_h > 9,6; \sigma < 80/2400$$

$$F_e = 3,76 \text{ cm}^2$$

$$\text{gew. 2 III } \emptyset 10 + 2 \text{ III } \emptyset 12; F_e = 3,9 \text{ cm}^2$$

aufgebogen 2 III $\emptyset 12$

Stütze: $M = 5,28 \text{ Mpm}$
 $k_h = 7,2$; $\sigma = 110/2400$
 $F_e = 6,85 \text{ cm}^2$
 gew. 6 III $\emptyset 12$; $F_e = 6,8 \text{ cm}^2$

Bügel I $\emptyset 6$, $e = 20 \text{ cm}$

$$\tau_o = 13,20/2 \cdot 0,86 \cdot 0,37 \cdot 0,20 = 104 \text{ Mp/m}^2$$

$$\text{erf } F_T = 3,76 + 6,85 = 10,61 \text{ cm}^2$$

aufgebogen	2 III $\emptyset 12$	=	3,2 cm^2
Bügel	12 I $\emptyset 6$	=	4,0 "
Zulage	2 III $\emptyset 12$	=	3,2 "
			<hr/>
		F_T	= 10,4 cm^2

Der Bewehrungsplan ist als Anlage 7.1 beigelegt.

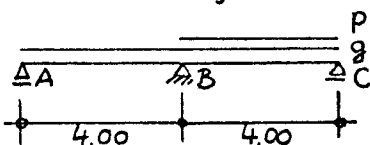
Bewehrungsführung:

Für die Staffelung der obenliegenden Stützbewehrung wurde eine Momentenverteilung zugrundegelegt, bei der über der Stütze das Grenzmoment für $\sigma_e = \beta_s$ bzw. $\epsilon_B \lesssim 3 \text{ ‰}$ (Plastisches Stützmoment) angesetzt wurde. Näherungsweise beträgt dieses plastische Moment $M_{pl} = 2 M_{zul}$.

Die Deckung der "plastischen Momentenlinie" ist auf Anlage 8.1 dargestellt.

7.1.2 Balken II

Statisches System:



Zweifeldträger

$$l_1 = l_2 = 4,00 \text{ m}$$

Gebrauchslasten:

Praktischen Fällen etwa entsprechend wurde die Verkehrslast genauso groß angenommen wie die ständige Last.

g_1	=	1,32 Mp/m
g_2	=	1,32 Mp/m
p_2	=	1,32 Mp/m
		<hr/>
q_2	=	2,64 Mp/m

Schnittgrößen:

$$\begin{aligned}
 M_B &= -0,125 \text{ g } l^2 - 0,063 \text{ p } l^2 = -2,64 - 1,32 &= -3,96 \text{ Mpm} \\
 \max M_B &= -0,125 \text{ q } l^2 &= -5,28 \text{ Mpm} \\
 A &= 0,5 \text{ g } l - M_B/l = 2,64 - 0,99 &= 1,65 \text{ Mp} \\
 B &= 0,5 \text{ g } l + 0,5 \text{ q } l + 2 M_B/l = 2,64 + 5,28 + 1,98 &= 9,90 \text{ Mp} \\
 C &= 0,5 \text{ q } l - M_B/l = 5,28 - 0,99 &= 4,29 \text{ Mp} \\
 M_1 &= A^2/2 \text{ g} &= 1,03 \text{ Mpm} \\
 M_2 &= C^2/2 \text{ q} &= 3,50 \text{ Mpm}
 \end{aligned}$$

Für die Bemessung wurde $\max M_B$ zugrundegelegt. Beide Felder wurden für $\max M_F = M_2$ bemessen.

Bemessung:

B 300 / St III b; zul $\sigma = 90(110)/2400$

$b_o/d_o/h = 20/40/37$; $b/d = 40/10$

Felder: $M = 3,50 \text{ Mpm}$
 $k_h > 8,9$; $\sigma < 90/2400$
 $F_e = 4,44 \text{ cm}^2$
 gew. 4 III $\emptyset 12$; $F_e = 4,5 \text{ cm}^2$
 aufgebogen 2 III $\emptyset 12$

Stütze: $M = 5,28 \text{ Mpm}$
 $k_h = 7,2$; $\sigma = 110/2400$
 $F_e = 6,85 \text{ cm}^2$
 gew. 6 III $\emptyset 12$; $F_e = 6,8 \text{ cm}^2$

Bügel I $\emptyset 6$, $e = 20 \text{ cm}$

$$\begin{aligned}
 \tau_o &= (5,28+0,99)/0,86 \cdot 0,37 \cdot 0,20 = 99 \text{ Mp/m}^2 \\
 \text{erf } F_T &= 4,44 + 6,85 = 11,29 \text{ cm}^2 \\
 \text{aufgebogen 2 III } \emptyset 12 &= 3,2 \text{ cm}^2 \\
 \text{Bügel 12 I } \emptyset 6 &= 4,0 \text{ " } \\
 \text{Zulage 2 III } \emptyset 14 &= 4,4 \text{ " } \\
 F_T &= 11,8 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

Der Bewehrungsplan ist als Anlage 7.2 beigelegt.

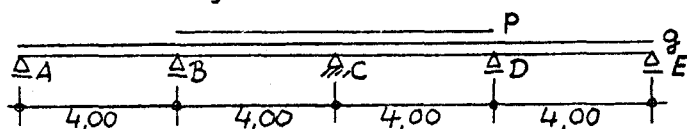
Bewehrungsführung:

Für die Staffelung der obenliegenden Stützbewehrung wurde die Anordnung des Balkens I beibehalten. Bei dieser Anordnung war im nur mit ständiger Last beanspruchten Feld 1 die "plastische Momentenlinie", die entstand, wenn über der Mittelstütze $M_{pl} = 2 M_{zul}$ angesetzt wurde, nicht voll gedeckt.

Die Deckung der "plastischen Momentenlinie" ist auf Anlage 8.2 dargestellt.

7.1.3 Balken III

Statisches System:



Vierfeldträger

$$l_1 - l_4 = 4,00 \text{ m}$$

Gebrauchslasten:

Die Gebrauchslasten wurden so angesetzt, daß der Stützquerschnitt C mit den zulässigen Spannungen ausgenutzt wurde.

Praktischen Fällen entsprechend wurde die Verkehrslast genauso groß angenommen wie die ständige Last.

$$\begin{aligned} g_1 &= g_4 &= 1,85 \text{ Mp/m} \\ g_2 &= g_3 &= 1,85 \text{ Mp/m} \\ p_2 &= p_3 &= 1,85 \text{ Mp/m} \\ \hline q_2 &= q_3 &= 3,70 \text{ Mp/m} \end{aligned}$$

Schnittgrößen:

$$\begin{aligned} M_B &= M_D = -0,107 g l^2 - 0,036 p l^2 = -3,17 - 1,07 &= -4,24 \text{ Mpm} \\ M_C &= -0,071 g l^2 - 0,107 p l^2 = -2,11 - 3,17 &= -5,28 \text{ Mpm} \\ A &= E = 0,5 g l - M_B/l = 3,70 - 1,06 &= 2,64 \text{ Mp} \\ B_1 &= D_4 = 0,5 g l + M_B/l = 3,70 + 1,06 &= 4,76 \text{ Mp} \\ B_2 &= D_3 = 0,5 q l + M_B/l - M_C/l = 7,40 + 1,06 - 1,32 &= 7,14 \text{ Mp} \\ B &= D &= 11,90 \text{ Mp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_2 = C_3 &= 0,5 \text{ q l} - M_B/l + M_C/l = 7,40 - 1,06 + 1,32 = 7,66 \text{ Mp} \\
 C &= 15,32 \text{ Mp} \\
 M_1 = M_4 &= A^2/2 \text{ g} = 1,88 \text{ Mpm} \\
 M_2 = M_3 &= B_2^2/2 \text{ q} + M_B = 6,90 - 4,24 = 2,66 \text{ Mpm}
 \end{aligned}$$

Bemessen wurde für die Momente, die bei dem vorliegenden Lastfall auftreten.

Bemessung:

B 300 / St III b; zul $\sigma = 90(110)/2400$

$b_o/d_o/h = 20/40/37$; $b/d = 40/10$

Innenfelder: $M = 2,66 \text{ Mpm}$

$k_h > 10,2$; $\sigma < 70/2400$

$F_e = 3,31 \text{ cm}^2$

gew. 2 III $\emptyset 8 + 2 \text{ III } \emptyset 12$; $F_e = 3,3 \text{ cm}^2$
aufgebogen 2 III $\emptyset 12$

Stütze B: $M = 4,24 \text{ Mpm}$

$k_h = 8,0$; $\sigma \sim 95/2400$

$F_e = 5,50 \text{ cm}^2$

gew. 4 III $\emptyset 10 + 2 \text{ III } \emptyset 12$; $F_e = 5,5 \text{ cm}^2$

Stütze C: $M = 5,28 \text{ Mpm}$

$k_h = 7,2$; $\sigma = 110/2400$

$F_e = 6,85 \text{ cm}^2$

gew. 6 III $\emptyset 12$; $F_e = 6,8 \text{ cm}^2$

Bügel I $\emptyset 6$, $e = 20 \text{ cm}$

$\tau_o = 7,66/0,86 \cdot 0,37 \cdot 0,20 = 120 \text{ Mp/m}^2$

erf $F_\tau = 3,31 + 6,85 > 10,16 \text{ cm}^2$

aufgebogen 2 III $\emptyset 12 = 3,2 \text{ cm}^2$

Bügel 10 I $\emptyset 6 = 3,6 \text{ ''}$

Zulage 2 III $\emptyset 12 = 3,2 \text{ ''}$

$F_\tau = 10,0 \text{ cm}^2$

Der Bewehrungsplan ist als Anlage 7.3 beigelegt.

Bewehrungsführung:

Für die Staffelung der obenliegenden Stützbewehrung wurde eine Momentenverteilung zugrundegelegt, bei der über den Stützen B, C und D die Grenzmomente für $\sigma_e = \beta_s$ bzw. $\epsilon_B \lesssim 3 \text{ ‰}$ (plastisches Stützmoment) angesetzt wurde.

Näherungsweise betragen diese plastischen Momente $M_{pl} = 2 M_{zul}$.

Die Deckung der "plastischen Momentenlinie" ist auf Anlage 8.3 dargestellt.

7.2 Baustoffe

Für alle Versuchsbalken wurde ein Beton der Mindestgüte B 300 verwendet. Er hatte folgende Zusammensetzung:

Tafel 6 Betonaufbau

Betonsand	0 - 3	665 kg/m ³
"	3 - 7	295 kg/m ³
Betonkies	7 - 15	475 kg/m ³
"	15 - 30	475 kg/m ³
<hr/>		
Betonkiessand	0 - 30	1900 kg/m ³
Zement PZ 275		270 kg/m ³

Das planmäßige Wasserzementverhältnis w/z betrug 0,65. Zur Erzielung einer gleichbleibenden Betongüte wurde das Ausbreitmaß kontrolliert und konstant gehalten.

Der Zuschlagstoff entstammte der Grube Riemenschneider, Braunschweig - Watenbüttel. Der Zement wurde vom Zementwerk Alemannia, Höver, geliefert.

Die Festigkeitswerte und der Feuchtigkeitsgehalt des Betons zum Zeitpunkt der Versuche betrugen:

Tafel 7 Festigkeit und Feuchte des verwendeten Betons

Balken	Alter in Tagen	Druckfestigkeit in kp/cm^2	Feuchte in Gew.-%
I	170	426	3,5
II	172	429	3,4
III	188	447	3,7

Für die Biegezugbewehrung der Balken wurde St III b (Rippentorstahl) verwendet. Die an einer Probe gewonnene Spannungs-Dehnungsline für Normaltemperatur ist in Anlage 9 dargestellt.

7.3 Meßquerschnitte

Über der jeweiligen Mittelstütze der Versuchsbalken wurden für die Messung der Stahldehnung der obenliegenden Stützbewehrung durch Setzdehnungsmesser mit der Meßlänge $l = 200$ mm Meßmarken aus Messing vor dem Betonieren der Bewehrungsstäbe befestigt. Um sie von oben zugänglich zu erhalten, wurden durch Kunststoffhülsen Aussparungen im überdeckenden Beton hergestellt. Je Balken wurden zwei Meßstrecken angeordnet.

An jeder Dehnungsmeßstelle wurde zur Temperaturkompensation eine Temperaturmeßstelle (Fe-Const.-Thermoelement) zwischen beiden Meßmarken am Stahl angebracht.

Für die Messung der Stahltemperatur der untenliegenden Feldbewehrung wurden in Feldmitte der beheizten Felder Fe-Const.-Thermoelemente an den außen- und innenliegenden Stählen angebracht.

7.4 Lagerung und Trocknung

Die Versuchsbalken wurden in einer geschlossenen Halle gelagert, die annähernd des Normklima 20/65 aufwies.

Durch Trocknung von Betonproben, die für den untersuchten Querschnitt repräsentativ waren, bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz wurde zum Zeitpunkt der Versuche der mittlere Betonfeuchtigkeitsgehalt ermittelt. Die festgestellten Werte sind in Tafel 7 angegeben.

8. Versuchsaufbau und -durchführung

8.1 Brandraum und Beheizung

Die Versuchskörper wurden als obere Abdeckung zweier Brandkammern mit den lichten Abmessungen

$$L = 3,50 \text{ m}$$

$$B = 4,00 \text{ m}$$

$$H = 1,55 \text{ m}$$

untersucht. Die Restfläche der Kammern war mit Gasbetonplatten abgedeckt. Die innere Ausmauerung dreier Brandraumwände und des Bodens bestand aus Hartschamotte, während die vierte - transportable - Wand, die das Mittelaufleger bildete, durch Gasbetonsteine geschützt war.

Die Beheizung erfolgte durch sechs Ölbrenner je Kammer unter Verwendung von Heizöl EL nach DIN 51 603 und folgte der Einheitstemperaturkurve gemäß DIN 4102. Je drei Brenner, deren Flammenachsen senkrecht zur Balkenspannungsrichtung 0,67 m über dem Brandkammerboden verliefen, befanden sich an den gegenüberliegenden Schmalseiten der Kammern. Die Flammenlänge betrug im allgemeinen etwa 0,8 bis 1,0 m. Die Rauchgase wurden durch Abzüge am Boden der Brandkammern abgesaugt.

8.2 Einbau und Belastung der Versuchskörper

Die Balken wurden so in den Versuchsstand eingebaut, daß die zu beflammenden Felder mit der Stützweite $l = 4,00 \text{ m}$ auf 3,50 m Länge der Brandbeanspruchung ausgesetzt waren. Die Auflager lagen außerhalb der Brandräume und wurden durch besondere Isolierung vor Wärmeeinwirkung geschützt. Bei allen Versuchen wurde das Mittelaufleger als festes und die Endauflager als bewegliche Lager ausgebildet.

Die Feldbelastung wurde durch hydraulische Pressen aufgebracht, deren Kraft über Lastverteiler (IPB-Stahlprofile) aufgeteilt und in vier Lastpunkten, bei $1/8 \ell$, $3/8 \ell$, $5/8 \ell$ und $7/8 \ell$ in den Balken eingetragen wurde. Die Pressenkraft wurde während des Versuchs konstant gehalten. Der Biegemomentenverlauf aus dieser Lastanordnung entspricht nicht exakt dem aus gleichmäßig verteilter Belastung. Die zulässigen und eingetragenen Biegemomente sowie die daraus resultierenden Stahlspannungen sind in Tafel 8 zusammengestellt.

Tafel 8 Momente und Stahlzugspannungen

Bal- ken	Belastetes Feld			unbelast. Feld			Mittelstütze			Außenstütze		
	M_{zul}	M_{vorh}	σ_{evorh}	M_{zul}	M_{vorh}	σ_{evorh}	M_{zul}	M_{vorh}	σ_{evorh}	M_{zul}	M_{vorh}	σ_{evorh}
	Mpm	Mpm	Mp/cm ²	Mpm	Mpm	Mp/cm ²	Mpm	Mpm	Mp/cm ²	Mpm	Mpm	Mp/cm ²
I	3,07	3,12	2,4				5,28	5,28	2,4			
II	3,55	3,62	2,5	3,55	1,04	0,7	5,28	3,96	1,8			
III	2,66	2,46	2,2				5,28	5,28	2,4	4,24	4,24	2,4

Beim Balken II war im Verlauf des Brandversuches am Endauflager A des nur mit ständiger Last beanspruchten und nichtbeflammten Feldes 1 eine negative Auflagerkraft zu erwarten (vergl. Anlage 8.2). Gegen Abheben wurde dieses Auflager daher durch eine hydraulische Presse gesichert.

Beim Balken III wurde an einem Kragarm mit verstärktem Querschnitt in 1,45 m Entfernung vom Endauflager eine Abspannvorrichtung angebracht. Mit Hilfe dieser Vorrichtung konnten vor Versuchsbeginn die planmäßigen Schnittgrößen (M_p) in den Stützquerschnitt eingeleitet und während des Brandversuchs anhand von Dehnungsmessungen an der Zugstange die Änderungen registriert werden. Der gegenüberliegende Kragarm wurde durch Unterstützung von unten und Pressenkraft von oben in seiner Ausgangsposition gehalten. Messungen wurden dort nicht vorgenommen.

Die Anordnung der Versuche I bis III ist auf den Anlagen 10.1 - 10.3 dargestellt.

8.3 Meßprogramm

Das Meßprogramm umfaßte folgende Aufgaben:

8.3.1 Messung der Brandraumtemperatur mit NiCr-Ni-Thermoelementen. Die Lage der Meßstellen ist aus den Anlagen 10.1 - 10.3 ersichtlich. Die Einheitstemperaturkurve gemäß DIN 4102 wurde dabei nur nach den untenliegenden Meßstellen gesteuert; die im Stegbereich der Balken liegenden Meßstellen dienten nur einem Test.

8.3.2 Messung der Stahltemperatur an der untenliegenden Feldbewehrung mit Fe-Const.-Thermoelementen jeweils in Feldmitte an einem außenliegenden und einem innenliegenden Stab.

8.3.3 Messung der Stahltemperatur an der obenliegenden Stützbewehrung mit Fe-Const.-Thermoelementen jeweils im Bereich der Dehnungsmeßstellen nach 8.3.4.

8.3.4 Messung der Stahldehnung an der obenliegenden Stützbewehrung mit Setzdehnungsmesser. Die Meßlänge betrug 200 mm. An jedem Balken wurden zwei Meßstrecken an einem Stab über der Mittelstütze vorgesehen.

8.3.5 Messung der vertikalen Durchbiegung der Versuchskörper mit Hilfe feiner Stahldrähte, die von der jeweiligen Meßstelle zu Rollenmeßgeräten geführt wurden. Die Anordnung der Meßstellen ist in den Anlagen 10.1 - 10.3 dargestellt.

8.3.6 Messung der Verdrehung der frei aufliegenden Balkenenden (nur bei Balken I und II) unter Verwendung feiner Stahldrähte, die über Rollenmeßgeräte die horizontale Verschiebung zweier oberhalb des Balkens gelegenen, an einem T-Profil fixierten Punkte angaben. Die Lage der Meßstellen ist aus den Anlagen 10.1 - 10.3 zu entnehmen.

8.3.7 Messung der Zugkräfte an der Abspanneinrichtung des Kragarms am Ver-

suchsbalken III. Die auftretenden Kräfte wurden durch ein oberes und unteres Traversen- und Zugstangenpaar in den Balken bzw. das untere Widerlager gelenkig eingeleitet. Als verbindendes Zugglied diente ein Spannstahl St 80/105 Ø 22, an dem die Dehnungsmessungen mittels Klemmdehnungsmesser vorgenommen wurden. Die Einleitung der planmäßigen Zugkraft in die Abspanneinrichtung bzw. des Gebrauchsmomentes in den Stützquerschnitt erfolgte durch gleichmäßiges Anziehen der Schraubenmutter am oberen Zugstangenpaar, bis die zugehörige errechnete Dehnung des Meßstabes erreicht war.

Gemessen wurden die Dehnungen des Meßstabes infolge der Änderung der Biegemomente aus Systemzwängungen während der Brandbeanspruchung.

8.4 Sonstige Beobachtungen

Das Verhalten der Versuchsbalken wurde während der Versuche dauernd kontrolliert; insbesondere wurden Feuchtigkeitsaustritt und Rißbildungen beobachtet.

9. Versuchsergebnisse

9.1 Versuchskörper I

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum lag im zulässigen Toleranzbereich der Einheitstemperaturkurve gemäß DIN 4102. Er ist auf Anlage 11.1 dargestellt.

Der Verlauf des Temperaturanstiegs an der untenliegenden Feldbewehrung ist auf Anlage 11.1 dargestellt. Die kritische Stahltemperatur von $T_{\text{krit}} = 500^{\circ}\text{C}$ +) wurde an den außenliegenden Stäben nach 49 min und an den innenliegenden Stäben nach 59 min Versuchsdauer erreicht. Beim Versagen des Prüfkörpers nach 69 Versuchsminuten betrugen die Temperaturen an den außenliegenden Stäben 630°C , an den innenliegenden 545°C , im Mittel rd. $585 - 590^{\circ}\text{C}$.

+) siehe Kordina: Grundlagen für den Entwurf von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen mit bestimmter Feuerwiderstandsdauer. Stahlbeton-Berichte aus Forschung und Praxis, Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H. Rüschi, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin u. München, 1969.

Der Anstieg der Temperatur an der obenliegenden Stützbewehrung ist auf Anlage 11.1 dargestellt. Die Werte stiegen bis zum Versuchsende um im Mittel 85 grd.

Auf Anlage 12.1 sind die im Versuchsverlauf gemessenen Dehnungen der Stützbewehrung aufgetragen. Der Linienzug des Diagramms zeigt die reinen Spannungsdehnungen; die Temperaturdehnungen wurden bereits mit Hilfe der Temperaturmeßwerte des betreffenden Stabes (vergl. Anlage 11.1) abgezogen. Dabei wurde der Temperaturdehnungskoeffizient zu $\alpha_T = 10^{-5}$ angenommen. Die zugehörigen Stahlspannungen, ermittelt nach dem Spannungsdehnungsdiagramm (Anlage 9), wurden in dasselbe Bild eingetragen. Aus den Stahlspannungen wurden die während des Versuchsverlaufs aufgetretenen Stützmomente gewonnen. Für deren Berechnung wurde im elastischen Bereich das n-Verfahren benutzt, während im plastischen Bereich folgender Ansatz gemacht wurde:

$$\begin{aligned} F_e &= 6,8 \text{ cm}^2 \\ \sigma_e &= \beta_s = 4,29 \text{ Mp/cm}^2 \\ Z_s &= F_e \cdot \beta_s = 29,2 \text{ Mp} \\ Z_s &= D_b \\ D_b &= v \cdot \frac{7}{8} W_b \cdot b \cdot x \\ v &= \text{Fülligkeitsgrad der Biegedruckzone} = 0,75 \\ x &= 29,2 \cdot 8 / 7 \cdot 0,75 \cdot 4000 \cdot 0,20 = 0,056 \text{ m} \\ x' &= \text{Abstand der Biegedruckkraft vom} \\ &\quad \text{gedrückten Rand} = 0,4 x = 0,022 \text{ m} \\ z &= h - x' = 0,348 \text{ m} \\ M &= z \cdot F_e \cdot \sigma_e \quad (\text{m} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Mp/cm}^2) = 2,36 \sigma_e \end{aligned}$$

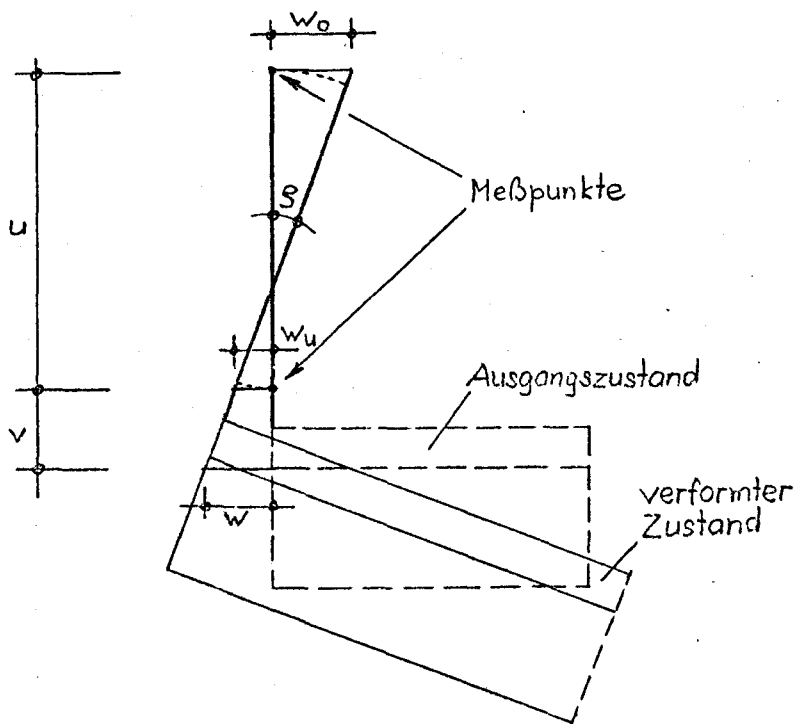
Das Diagramm zeigt, daß das erwartete plastische Stützmoment in den ersten zwanzig Versuchsminuten aufgebaut wurde.

Die vertikale Durchbiegung des Versuchskörpers ist in Anlage 13.1 dargestellt. Dabei wurde die Verformung unter Eigengewicht gleich 0 gesetzt.

Aufgetragen sind die Biegelinien unter g+p, sowie nach 15, 30, 45, 60 und 65 min Versuchsdauer. Der Bruchquerschnitt im Feld 2, mit der Entfernung 2,10 m von der Mittelstütze, ist markiert.

Anlage 14.1 zeigt die Veränderung der Verdrehung der frei aufliegenden Balkenenden, wobei der Endtangentialwinkel ρ unter Eigengewicht gleich 0 gesetzt wurde. Aus den gleichen Meßwerten wurde die horizontale Verschiebung w des Versuchsbalkens (Faser am Anschnitt der Platte) bestimmt.

Skizze 1: Endverdrehung ρ und Horizontalverschiebung w



$$\sin \varphi \sim \operatorname{tg} \varphi \sim \varphi = \frac{w_0 + w_u}{u}$$

$$W = \frac{W_0 + W_u}{u} \cdot V + W_u$$

Die Verdrehung der Endauflager nahm während des Versuchs stetig zu bis zum Endwert $\rho = 0,035$, der nach 65 Versuchsminuten, 4 min vor dem Bruch, an beiden Endauflagern gemessen wurde. Nach Aufbringen der Gebrauchslast verkürzte sich der Versuchskörper zunächst geringfügig. Dann trat unter Be-
flammung stetige Verlängerung ein bis zu den Endwerten $w_1 = 21$ mm im Feld 1 und $w_2 = 22$ mm im Feld 2, wiederum gemessen nach 65 Versuchsminuten.

Die sonstigen Beobachtungen während des Brandversuches sind in der folgenden Tafel 9 zusammengestellt.

Tafel 9 Beobachtungen am Versuchskörper I

Beobachtungs- zeit (min)	B e o b a c h t u n g e n
6	Bildung von Querrissen über dem Mittelaufleger.
16	Breite obiger Risse bis 1 mm, Rißabstand etwa 20 cm. Bildung von Querrissen in den Feldern.
17	Querriß am Ende der oberen Stützbewehrung im Feld 2 etwa 1 mm breit.
18	Entsprechender Riß auch im Feld 1.
22	Querriß am Stützbewehrungsende Feld 2 etwa 1,5 mm breit.
30	" " " " " 2,5 " "
39	" " " " " 4 " "
50	" " " " " 6 " "
65	" " " " " 12 " "
	Der Riß geht durch die Platte bis etwa 5 cm in den Steg.
67	Steg reißt weiter auf.
36	Weitere Querrißbildung im Bereich der oberen Stützbewehrung, Abstand 10 - 15 cm.
bis Versuchs- ende	Rißerweiterung am Stützbewehrungsende Feld 1 bis auf etwa 20 mm.
9	Betonflächen im Brandraum erscheinen feucht.
16	Feuchtigkeitsaustritt auf der Balkenoberseite Feld 2
18	Feuchtigkeitsaustritt auf der Balkenoberseite Feld 1
33	Betonflächen im Brandraum abgetrocknet
bis Versuchs- ende	Wasser- und Dampfaustritt auf der Balkenoberseite, besonders aus den Rissen.

Von der 65. Versuchsminute an erweiterte sich der Riß am Ende der Stützbewehrung im Feld 2 rapide und trennte schrägverlaufend den Steg bis zur unteren Bewehrung auf. In der 69. Minute trat der Bruch ein, wobei die Bügel abgerissen und die untere Bewehrung abgeknickt wurden.

Die Bruchstelle ist auf den Bildern 16 und 17 zu sehen. Die Bilder 18 und 19 zeigen den ganzen Balken nach dem Versuch.

9.2 Versuchskörper II

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum lag im zulässigen Toleranzbereich der Einheitstemperaturkurve gemäß DIN 4102. Er ist auf Anlage 11.2 dargestellt.

Der Verlauf des Temperaturanstiegs an der untenliegenden Feldbewehrung des beheizten Feldes 2 ist auf Anlage 11.2 dargestellt. Die kritische Stahltemperatur von $T_{\text{krit}} = 490^{\circ}\text{C}$ wurde an den außenliegenden Stäben nach 45 min und an den innenliegenden Stäben nach 60 min Versuchsdauer erreicht. Beim Versagen des Prüfkörpers nach 82 Versuchsminuten betrugen die Temperaturen an den außenliegenden Stäben 742°C , an den innenliegenden 602°C , im Mittel rd. 670°C .

Der Anstieg der Temperatur an der obenliegenden Stützbewehrung ist auf Anlage 11.2 dargestellt. Die Werte stiegen bis zum Versuchsende um im Mittel 90 grd.

Auf Anlage 12.2 sind die im Versuchsverlauf gemessenen Dehnungen der Stützbewehrung aufgetragen. Der Linienzug des Diagramms zeigt die reinen Spannungsdehnungen; die Temperaturdehnungen wurden bereits mit Hilfe der Temperaturmeßwerte des betreffenden Stabes (vergl. Anlage 11.2) abgezogen. Dabei wurde der Temperaturdehnungskoeffizient zu $\alpha_T = 10^{-5}$ angenommen. Die zugehörigen Stahlspannungen, ermittelt nach dem Spannungs-Dehnungsdiagramm (Anlage 9), wurden in dasselbe Bild eingetragen. Aus den Stahlspannungen wurden die während des Versuchsverlaufs auftretenden Stützmomente gewonnen. Für deren Berechnung wurde das n-Verfahren benutzt, da die Stahlspannungen im elastischen Bereich blieben.

Das Diagramm zeigt, daß das Stützmoment in den ersten zwanzig Versuchsminuten anwuchs, dann bis etwa 50 min kleiner wurde und dann erneut bis zum Versuchsende anstieg. Das erwartete plastische Moment wurde nicht erreicht.

Die vertikale Durchbiegung des Versuchskörpers ist in Anlage 13.2 dargestellt. Dabei wurde die Verformung unter Eigengewicht = 0 gesetzt. Aufgetragen sind die Biegelinien unter $g+p$, sowie nach 15, 30, 45, 60, 75 und 80 min Versuchsdauer. Der Bruchquerschnitt im Feld 1, mit der Entfernung 1,40 m von der Mittelstütze, ist markiert.

Anlage 14.2 zeigt die Veränderung der Verdrehung des Endauflagers des Feldes 2, wobei der Endtangentialwinkel ρ unter Eigengewicht gleich 0 gesetzt wurde. Aus den gleichen Meßwerten wurde die horizontale Verdrehung w des Versuchsbalkens (Faser am Anschnitt der Platte) bestimmt.

Die Verdrehung des Endauflagers nahm während des Versuchs stetig zu bis zum Endwert $\rho = 0,082$, der nach 80 Versuchsminuten, 2 min vor dem Bruch, gemessen wurde.

Nach dem Aufbringen der Gebrauchslast verkürzte sich der Versuchskörper zunächst geringfügig. Dann trat unter Beflammung stetige Verlängerung ein bis zum Endwert $w = 27$ mm, wiederum gemessen nach 80 Versuchsminuten.

Die sonstigen Beobachtungen während des Brandversuchs sind in der folgenden Tafel 10 zusammengestellt.

Tafel 10 Beobachtungen am Versuchskörper II

Beobachtungszeit (min)	B e o b a c h t u n g e n
5	Bildung von Querrissen über dem Mittelaufleger.
15	Bildung von Querrissen im belasteten, beheizten Feld 2.
34	Querriß am Stützbewehrungsende, Feld 2, etwa 1 mm breit
43	" " " " 2 " "

Fortsetzung folgendes Blatt

Fortsetzung Tafel 10

Beobachtungs- zeit (min)	B e o b a c h t u n g e n
48	Querriß am Stützbewehrungsende, Feld 2, etwa 2,5 mm breit
53	" " " " 3 " "
58	" " " " 3,5 " "
62	" " " " 4 " "
65	" " " " 4,5 " "
67	" " " " 5 " "
69	" " " " 5-6 " "
77	" " " , nicht vergrößert.
79	Querriß am Stützbewehrungsende, Feld 2, geht durch die Platte in den Steg; Deckung der unteren Bewehrung platzt ab.
40	Weitere Querrißbildung im Bereich der oberen Stützbewehrung.
54	Rißbreite im Bereich des Mittelaufagers bis 1,5 mm, Abstand etwa 15 - 20 cm.
67	Breite obiger Risse bis 2 mm.
80	Rasche Erweiterung eines Risses, 1,40 m vom Mittelauflager entfernt, im unbelasteten, unbeheizten Feld 1.
9	Betonflächen im Brandraum erscheinen feucht.
20	Beginn des Abtrocknens der Betonflächen im Brandraum.
23	Balkenoberseite Feld 2 fast durchgehend naß.
58	Balkenoberseite fast abgetrocknet, jedoch
bis Versuchs- ende	Dampfaustritt aus den Rissen.

Von der 80. Versuchsminute an erweiterte sich ein Querriß im unbelasteten, unbeheizten Feld 1, der sich bis dahin nicht von seinen benachbarten unterschied, rapide und führte zum Bruch in der 82. Minute, wobei die obenliegende

Stützbewehrung - in diesem Bereich noch 2 III \emptyset 12 = $\frac{1}{3} F_e$ Stütz - durchgerissen wurde.

Die Bruchstelle ist auf Bild 20 zu sehen. Bild 21 zeigt den Zustand des belasteten und beheizten Feldes 2 nach dem Versuch, und auf den Bildern 22 und 23 ist der ganze Balken nach dem Versuch dargestellt.

9.3 Versuchskörper III

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum lag im zulässigen Toleranzbereich der Einheitstemperaturkurve gemäß DIN 4102. Er ist auf Anlage 11.3 dargestellt.

Der Verlauf des Temperaturanstiegs an der untenliegenden Feldbewehrung ist auf Anlage 11.3 dargestellt. Die kritische Stahltemperatur von $T_{krit} = 515^{\circ}\text{C}$ wurde an den außenliegenden Stäben nach 40 min und an den innenliegenden Stäben nach 65 min Versuchsdauer erreicht. Der Verlauf der Temperatur konnte nicht bis zum Versuchsende nach 180 min verfolgt werden, da er den Meßbereich von 900°C überschritt.

Der Anstieg der Temperatur an der obenliegenden Bewehrung über der Mittelstütze ist auf Anlage 11.3 dargestellt. Die Werte stiegen bis zum Versuchsende um im Mittel 225 grd.

Auf Anlage 12.3 sind die im Versuchsverlauf gemessenen Dehnungen der Bewehrung über der Mittelstütze aufgetragen. Der Linienzug des Diagramms zeigt die reinen Spannungsdehnungen; die Temperaturdehnungen wurden bereits mit Hilfe der Temperaturmeßwerte des betreffenden Stabes (vergl. Anlage 11.3) abgezogen. Dabei wurde der Temperaturdehnungskoeffizient zu $\alpha_T = 10^{-5}$ angenommen. Die zugehörigen Stahlspannungen, ermittelt nach dem Spannungs-Dehnungsdiagramm (Anlage 9), wurden in dasselbe Bild eingetragen. Aus den Stahlspannungen wurden die während des Versuchsverlaufs auftretenden Stützmomente gewonnen. Für deren Berechnung wurde das n-Verfahren benutzt, da die Stahlspannungen im elastischen Bereich blieben.

Das Diagramm zeigt einen Anstieg des Stützmomentes in den ersten 20 Versuchs-

minuten. Danach ist ein geringer Abfall bis etwa 50 min festzustellen. Bis zum Versuchsende wuchs das Stützmoment dann wieder leicht an. Das erwartete plastische Moment wurde nicht erreicht.

Die vertikale Durchbiegung des Versuchskörpers ist in Anlage 13.3 dargestellt. Dabei wurde die Verformung unter Eigengewicht gleich 0 gesetzt. Aufgetragen sind die Biegelinien unter $g+p$, sowie nach 30, 60, 90, 120, 150 und 180 min Versuchsdauer.

Anlage 15 zeigt die Veränderung der Zugkraft in der Abspannvorrichtung am Kragarm des Systems. Daraus wurde unter Einbeziehung des Kragarmeigengewichts das zugehörige Moment über der Außenstütze berechnet und ebenfalls in das Diagramm eingetragen. Es ist innerhalb der ersten 35 min Versuchsdauer ein Anstieg des Stützmomentes auf die Größenordnung des plastischen Momentes ($M_{\text{plast}} \sim 8,5 \text{ Mpm}$) festzustellen. Bis etwa 90 min bleibt das Moment konstant, um danach bis zum Versuchsende wieder leicht abzufallen.

Die sonstigen Beobachtungen während des Brandversuchs sind in der folgenden Tafel 11 zusammengestellt.

Tafel 11 Beobachtungen am Versuchskörper III

Beobachtungszeit (min)	B e o b a c h t u n g e n
5	Bildung von Querrissen über dem Mittelaufleger.
14	Bildung von Querrissen in den Feldern und über den Außenstützen.
28	Rißbreite im Stützbereich bis etwa 0,8 mm.
31	Quèrrisse in 1,30 m Entfernung vom Mittelaufleger bilden sich etwas deutlicher aus.
38	Breite der Risse im Bereich der Mittelstütze etwa 1,2 mm.
70	" " " " " " " 2 mm.
102	Quèrrisse in 1,30 m Entfernung vom Mittelaufleger verbreitern sich auf beiden Seiten.
135	Breite obiger Risse etwa 3 mm.
bis Versuchs- ende	keine wesentliche Veränderung des Rißbildes.

Fortsetzung Tafel 11

Beobachtungs- zeit (min)	B e o b a c h t u n g e n
10	Betonflächen im Brandraum erscheinen feucht.
16	Feuchtigkeitsaustritt auf der Balkenoberseite Feld 1.
18	Feuchtigkeitsaustritt auf der Balkenoberseite Feld 2.
25	Betonflächen im Brandraum beginnen abzutrocknen.
58	Feuchtigkeit auf der Balkenoberseite deutlich weniger, jedoch weiterhin Wasser- und Dampfaustritt, besonders aus den Rissen.
97	Balkenoberseite trocken, auch Dampfbildung hat fast ganz aufgehört.

Der Versuch wurde nach 180 min beendet.

Die Bilder 24 und 25 zeigen die Zermürbung des Betons in der Biegedruckzone im Bereich der Mittelstütze nach dem Versuch.

10. Diskussion der Versuchsergebnisse

Der Brandversuch am Balken I wurde durchgeführt als Bestätigung der in den Versuchen des Teiles A gewonnenen Annahme, daß es bei Endfeldern von Durchlaufsystemen ausreicht, die obere Stützbewehrung bis $0,4 \ell$ (gemessen vom freien Endauflager) zu führen und dort enden zu lassen. Die Stützbewehrung wurde jedoch, da $0,4 \ell$ nur ein Richtmaß darstellt, nach dem zu erwartenden plastischen Stützmoment gestaffelt, d.h. es wurde eine Momentenverteilung zugrundegelegt, bei der über der Mittelstütze das Grenzmoment $M_B = 2 M_{B\text{zul}}$ angesetzt war. Die Verankerungslängen wurden nach den Vorläufigen Richtlinien für Zulassung und Anwendung von querverripptem Betonrippenstahl (in den betreffenden Punkten auch gültig für Rippen-Torstahl), Abschnitt 7.3.1. und Tafel 6, bestimmt. Die Stäbe wurden danach um das Maß $a_g = 60 d$ über den Punkt hinausgeführt, an dem sie voll beansprucht wurden. Die letzten Stäbe der Stützbewehrung endeten so bei $0,475 \ell$, gemessen vom Endauflager (vergl. Anlage 7.1).

Während des Brandversuchs am Balken I entstand - neben vielen anderen - am Ende der oberen Stützbewehrung in beiden - belasteten und beheizten - Feldern auf der Balkenoberseite ein Querriß, der sich bereits nach 17 Versuchsminuten deutlicher als alle anderen markierte und später zum Bruch nach 69 min führte. Das Moment über der Mittelstütze hatte nach 17 min den Wert $M_B = 10 \text{ Mpm}$ (vergl. Anlage 12.1), also schon annähernd die Größe des erwarteten plastischen Momentes $M_{B \text{ plast}} = 10,6 \text{ Mpm}$ erreicht. Es bildete sich ein Koppelgelenk im betrachteten Querschnitt. Durch den allmählich tiefer gehenden Riß wurde die Mitwirkung des Betons an der Aufnahme der Gelenkquerkraft bis auf 0 herabgesetzt. Die unterliegende Feldbewehrung wurde bis zum Versuchsende auf i.M. 590°C erwärmt (vergl. 9.1), verlor dadurch weitgehend an Festigkeit und knickte ab.

Balken I entsprach Balken 7 des Berichtsteils A. Abgesehen davon, daß dort das zweite belastete und beheizte Feld nur durch einen Kragarm simuliert wurde, unterschied sich die Bewehrungsführung dadurch, daß beim Balken 7 die Bewehrungsenden abgebogen waren (vergl. Anlage 2.2). Auf diese Abbiegungen wurde beim Balken I verzichtet, da der etwaige Einfluß dieser Maßnahme nicht kontrollierbar ist und außerdem für die Praxis sehr unhandliche Biegeformen entstehen würden, falls man solche zusätzliche Verankerung fordern würde.

Es ist derzeit nicht möglich, den Unterschied im Brandverhalten von Balken 7 und Balken I (Feuerwiderstandsdauer von 113 min gegenüber 69 min) einleuchtend zu erklären. Schlupf der Stützbewehrung des Balkens I war zwar nicht festzustellen (Zerstörung), der Riß bildete sich vielmehr genau am Ende der letzten Stäbe, wo eine Zugbeanspruchung nur aus dem nichtlinearen Anteil der ungleichmäßigen Erwärmung des Balkens auftreten konnte, jedoch wird als ausschlaggebend angesehen, daß die Verankerungslänge = Eintragungslänge der Stahlzugkraft bis zur Fließgrenze mit dem praxisüblichen Maß nicht ausreicht.

Ein unmittelbarer Vergleich des Balkens I mit Balken 4 des Berichtsteils A ist nicht anzustellen, der bei Staffelung der Stützbewehrung nach der Gebrauchsmomentenlinie der Brandbeanspruchung länger standhielt (88 min gegenüber 69 min); denn die dort gemäß derzeit gültiger DIN 4102 im Feld oben durchgehende Bewehrung von $0,33 F_e \text{ Feld} \hat{=} 0,22 F_e \text{ Stütz}$ vermochte die Feuerwiderstandsfähigkeit beträchtlich zu verlängern.

Balken II deckte im Feld 1, das nur mit ständiger Last beansprucht und nicht beheizt war, die plastische Momentenlinie nicht voll ab, da die Staffelung der oberen Stützbewehrung genau wie bei Balken I erfolgte (vergl. Anlage 8.2). Trotzdem stellte sich zunächst das dem Balken I entsprechende Rißbild mit der deutlichen Markierung des Bewehrungsendes im belasteten und beheizten Feld 2 ein. Erst gegen Ende des Versuchs bildete sich ein Riß im Bereich der oberen Stützbewehrung (vorh $F_e = \frac{1}{3} F_{e \text{ Stütz}}$) auf der Balkenoberseite des unbelasteten Feldes 1 deutlich aus, der schnell zum Versagen durch Bruch der Bewehrung nach 82 min führte.

Trägt man über der Mittelstütze des Balkens II das Moment $M_B = 8 \text{ Mpm}$ auf und zeichnet die zugehörige Momentenlinie, so zeigt sich, daß genau in der effektiven Bruchstelle die Momentendeckung nicht mehr ausreicht. $M_B \sim 8 \text{ Mpm}$ wurde gemäß Anlage 12.2 nach 80 Versuchsminuten erreicht; zur gleichen Zeit markierte sich der entscheidende, schnell zum Bruch führende Riß (vergl. Tafel 10).

Ein dem Balken II unmittelbar vergleichbarer Versuch wurde im Berichtsteil A nicht durchgeführt.

Beim Balken III wurde die obere Stützbewehrung wiederum nach den zu erwartenden plastischen Stützmomenten über der Mittelstütze und über den ersten Innenstützen des simulierten Vierfeldsystems gestaffelt. Es ergab sich, daß die Feldmomente der belasteten und beheizten Innenfelder dabei im negativen Bereich blieben und somit eine durchgehende obere Bewehrung erforderlich wurde (vergl. Anlage 8.3). Diese Bewehrungsführung erwies sich als ausreichend, um den Versuchskörper über 180 min Versuchsdauer feuerwiderstandsfähig zu erhalten.

Trägt man die registrierten Stützmomente über der ersten Innenstütze (vergl. Anlage 15) und über der Mittelstütze (vergl. Anlage 12.3) auf, die nach 130 min (Ende der Messungen über der Mittelstütze) beide unter dem plastischen Moment liegen, wobei das Moment über der ersten Innenstütze fallende und das über der Mittelstütze steigende Tendenz aufweist, so bleibt die zugehörige Momentenlinie im Negativen, so daß die ohne Anzeichen des Versagens erreichten hohen Temperaturen an der unteren Bewehrung (vergl. Anlage 11.3) dadurch zu erklären sind, daß die Stähle keine Zugkraft aufzunehmen hatten.

Hinzuweisen ist noch auf die starke Zermürbung des Betons in der Biegedruckzone

im Bereich des Mittelauftragers (vergl. Bilder 24 und 25), die aber noch keine meßbare Verringerung der Balkentragfähigkeit zeitigte.

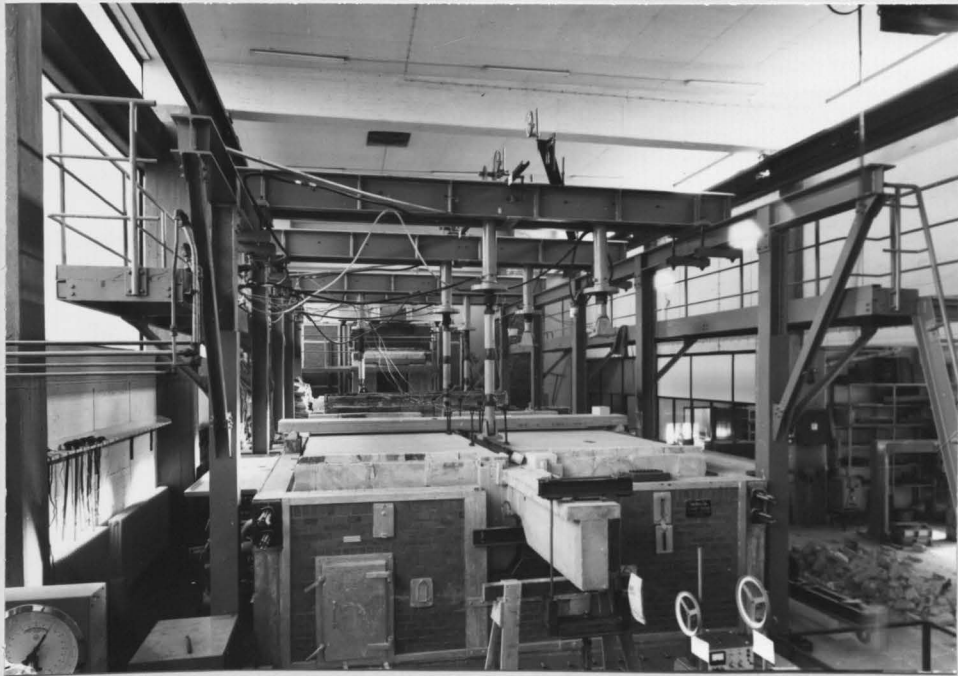
Nach den durch die Versuche I bis III gewonnenen, auf den Beobachtungen des Teils A aufbauenden Erfahrungen erscheint es nicht möglich, der Praxis absolute bzw. allein stützweitenabhängige Maße für die Führung der obenliegenden Stützbewehrung anzugeben, da Lastfälle und Brandbeanspruchungen auftreten können, die damit nicht zu erfassen sind. Das gilt beispielsweise für Verhältnisse, wie sie beim Balken II auftraten und auch für ähnliche Momenteneinstellung bei stark unterschiedlichen Systemspannweiten. Es muß vielmehr, wenn von der vergünstigenden Wirkung der Entlastung der Feldmomente durch den Anstieg der Stützmomente Gebrauch gemacht werden soll, für jeden Fall die Momentenlinie ermittelt werden, die sich bei Bildung von plastischen Momenten über den Stützen ergibt. Der Aufwand dafür ist jedoch nicht erheblich, da es sich nur um ein Verschieben der Gebrauchsmomentenlinie handelt.

Aufgabe der Forschung ist zunächst, festzustellen, welche Verankerungslängen des Stahles zur Deckung der plastischen Momentenlinie erforderlich sind.

In Anschlußversuchen muß geklärt werden, ob es in allen Fällen zur Erzielung von beispielsweise F_{90} ausreicht, die plastische Momentenlinie abzudecken. Besonders ist die Frage zu prüfen, ob bei stark unterschiedlichen Systemspannweiten, z.B. $l_1 = 2 l_2$, das dort im Verhältnis zum Feldmoment M_1 kleine Stützmoment M_B bei Vergrößerung auf M_B plast ausreicht, das Feld lange genug wirksam zu entlasten.

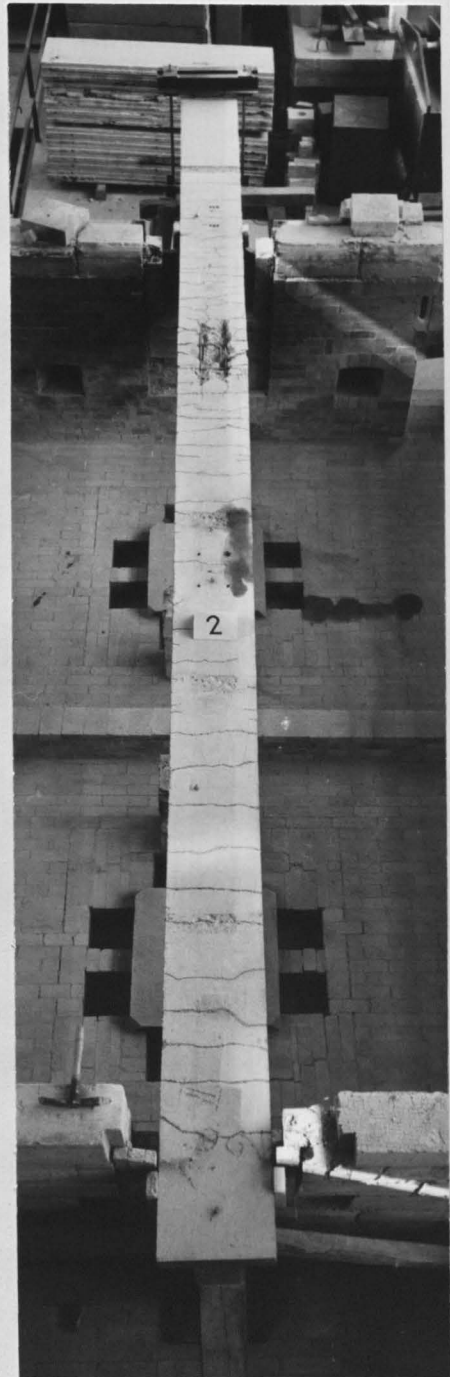
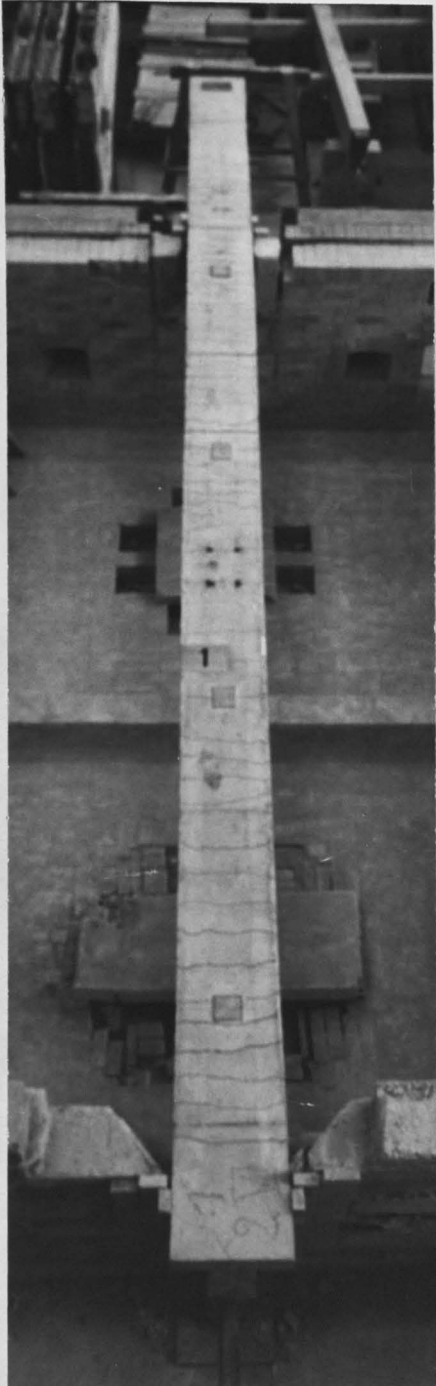
Die Frage, ob die zu fordernden Maßnahmen auch bei Platten mit Überdeckung der Feldbewehrung nach DIN 1045 ($\bar{u} = 1$ cm) und damit stärkerer Erwärmung der Feldbewehrung ausreichen, ist außerdem zu untersuchen.

Das Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig hofft, diese Anschlußversuche möglichst bald durchführen zu können, um der Praxis wirtschaftlich vertretbare Konstruktionsprinzipien an die Hand zu geben, die es ermöglichen, Stahlbetondrucklaufträger zielsicher für eine bestimmte Feuerwiderstandsdauer auszubilden.



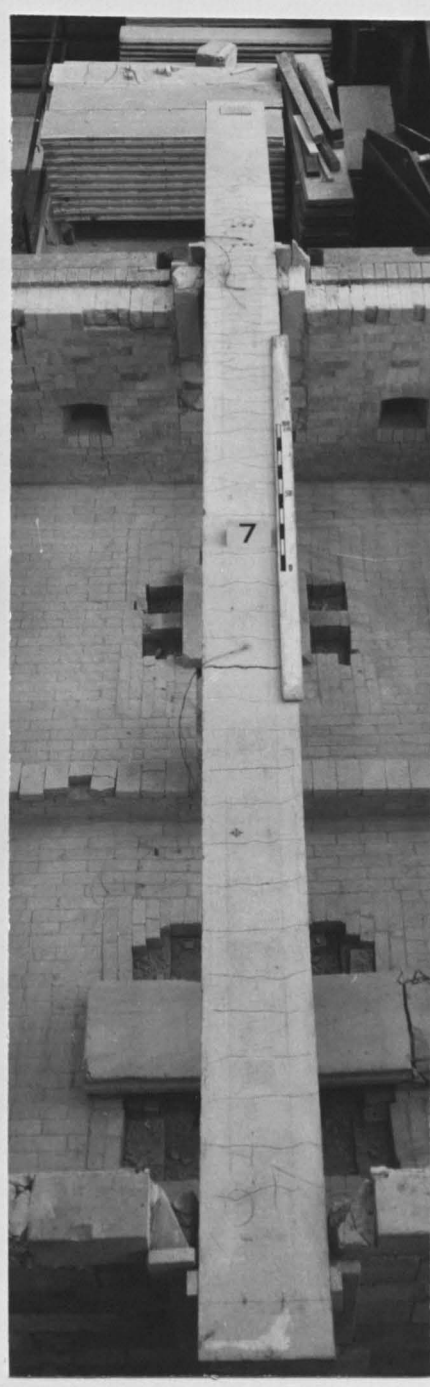
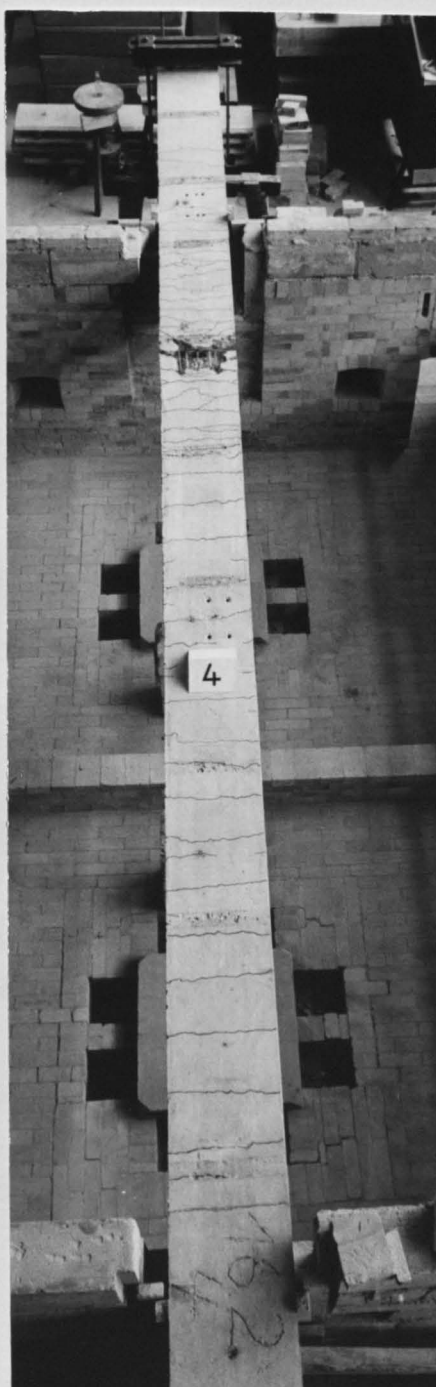
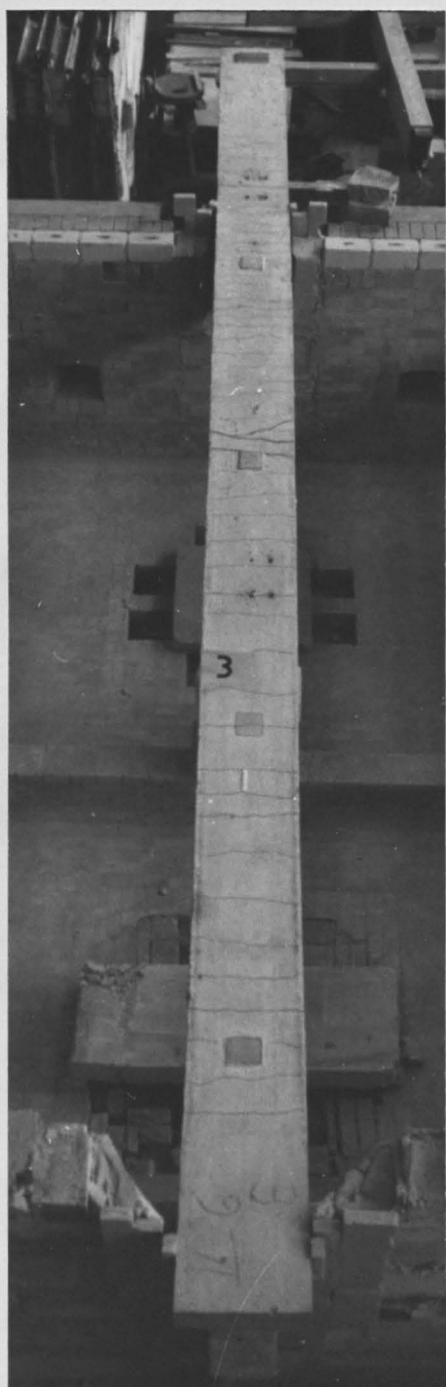
Versuchsaufbau
Balken 1-4 und 7

Bild
1 und 2



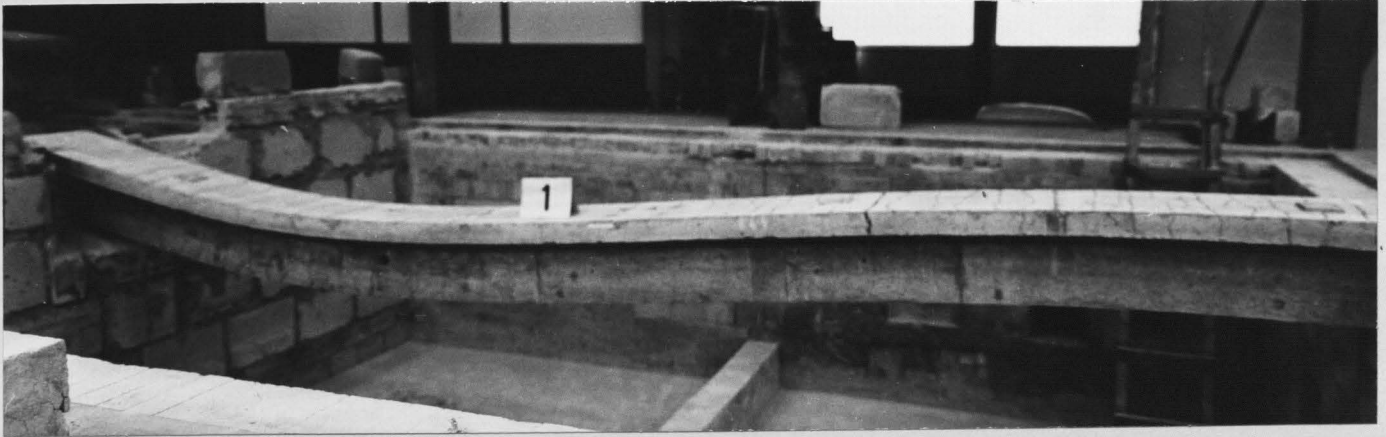
Draufsicht nach dem Brandversuch
Balken 1 und 2

Bild
3 und 4



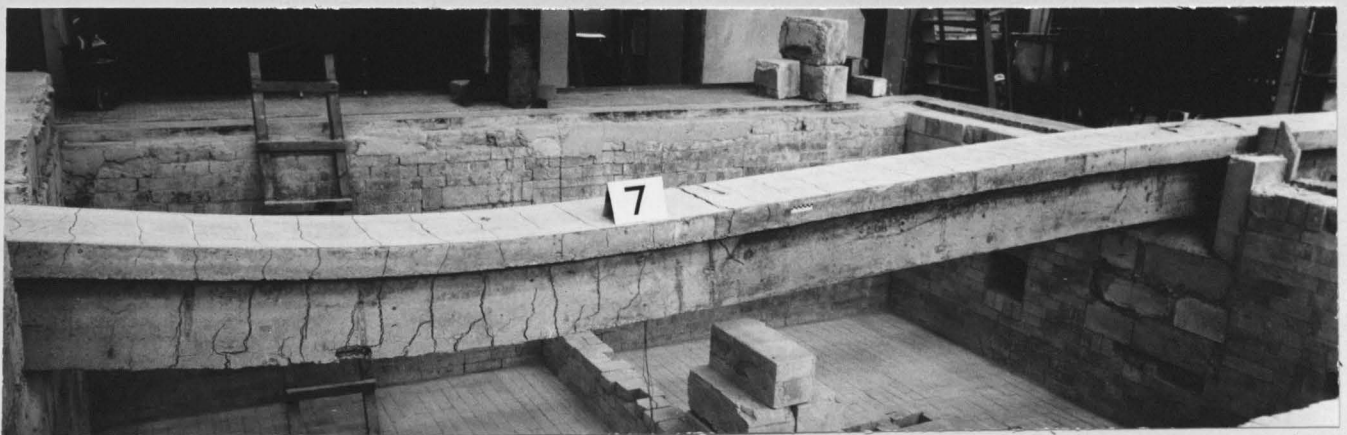
Draufsicht nach dem Brandversuch
Balken 3,4 und 7

Bild
5,6 und 7



Seitenansicht nach dem Brandversuch
Balken 1 und 2

Bild
8 und 9



Seitenansicht nach dem Brandversuch
Balken 3, 4 und 7

Bild
10,11 u. 12



Seitenansicht der Bruchstelle im
Stutzbereich ; Balken 2 und 4

Bild
13 und 14



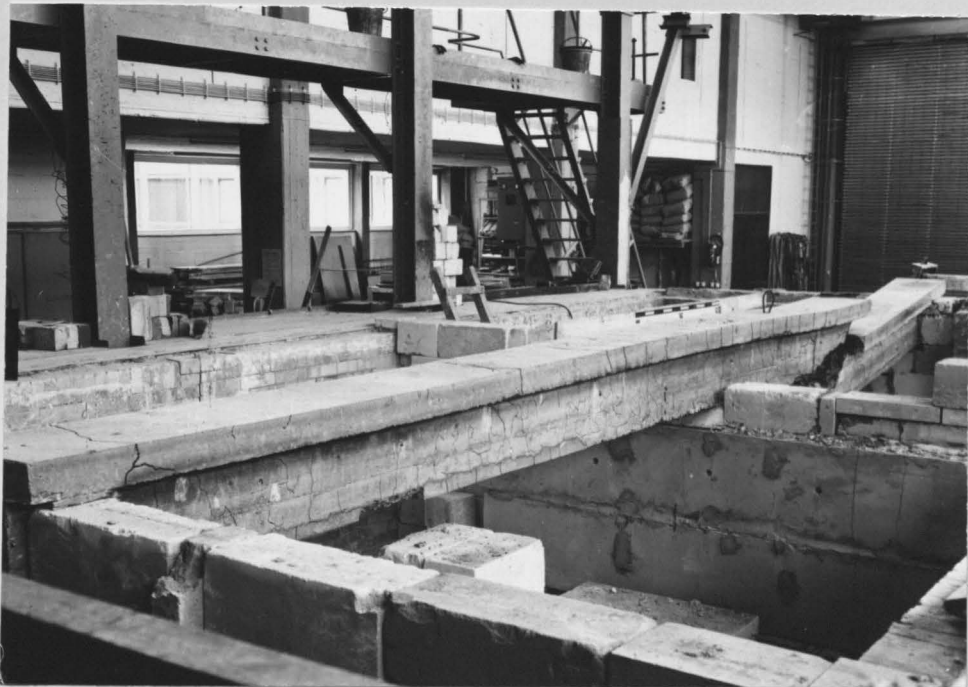
Draufsicht der Bruchstelle im
Stützbereich ; Balken 4

Bild
15



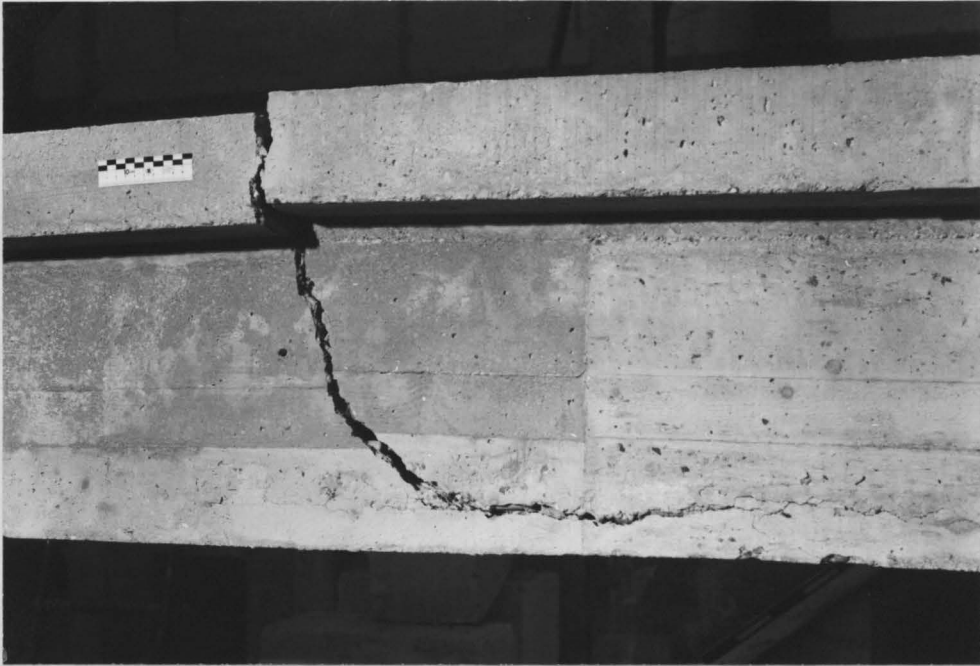
Ansichten der Bruchstelle
Balken I

Bild
16 und 17



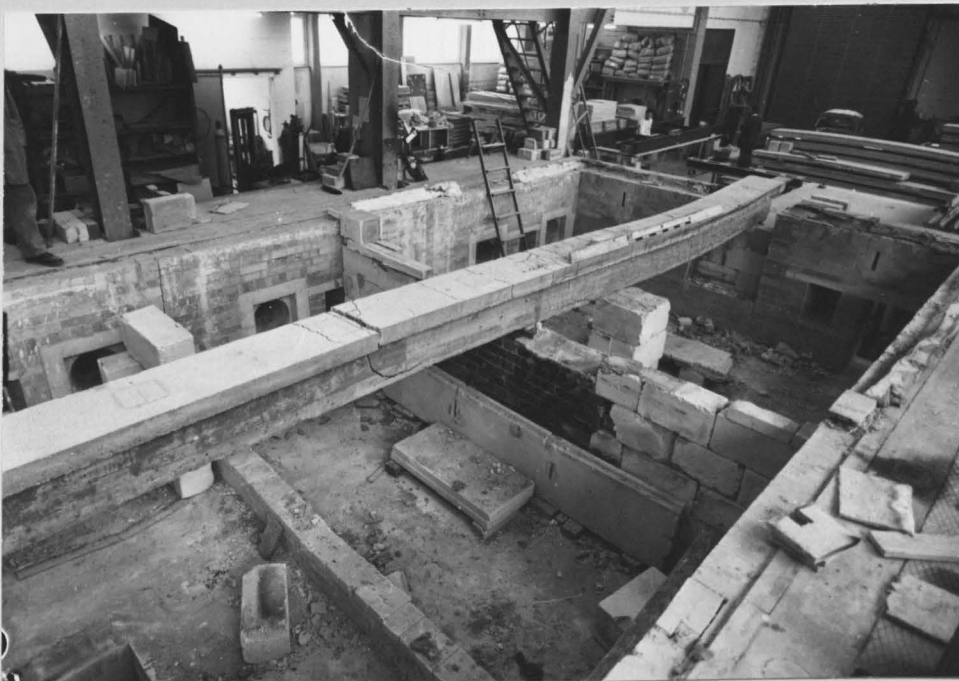
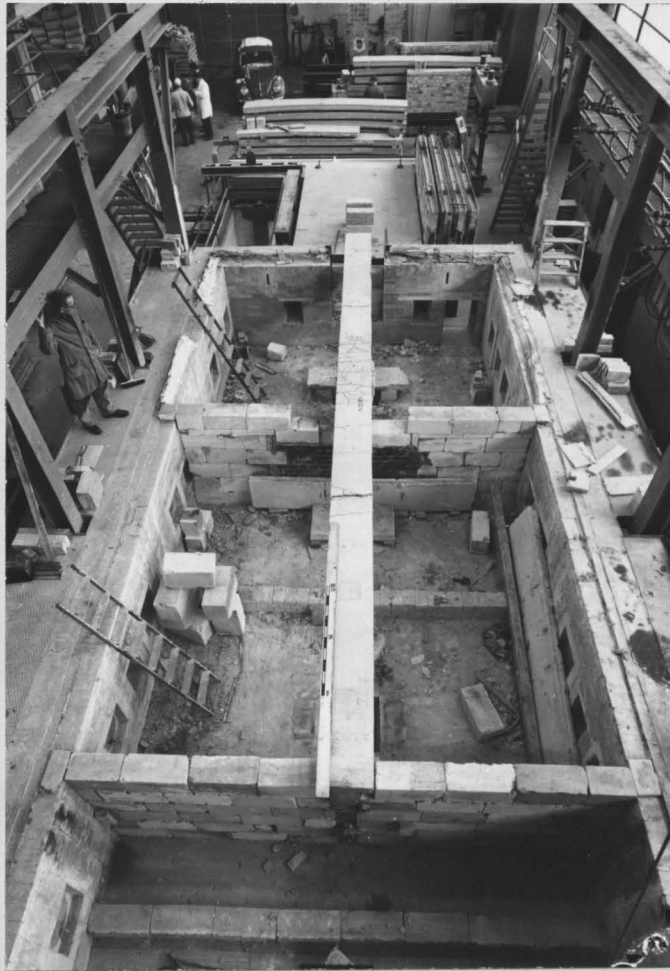
Gesamtansichten nach dem Brandversuch
Balken I

Bild
18 und 19



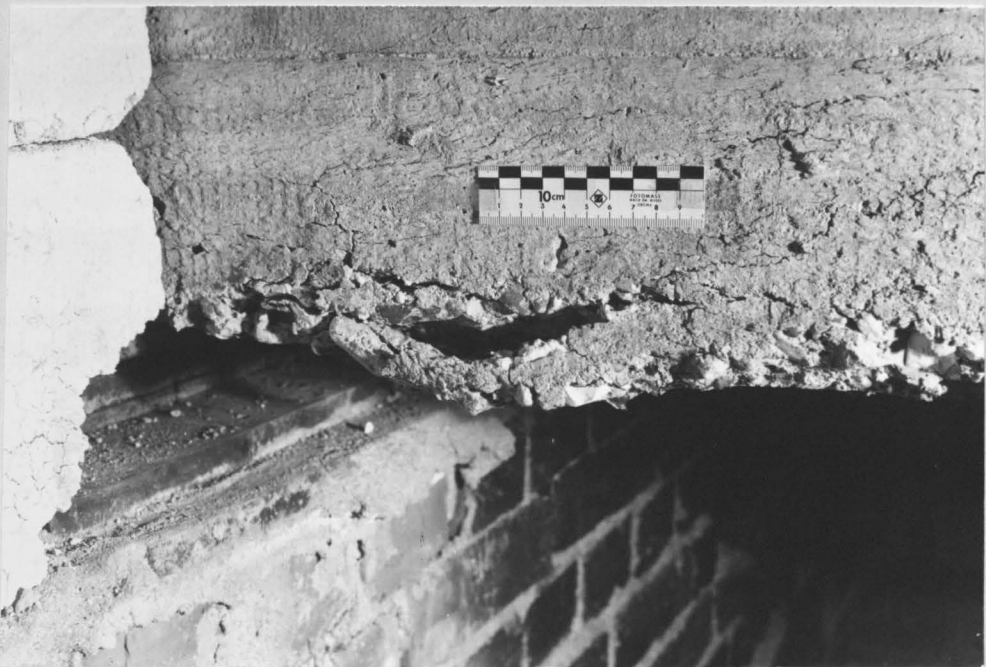
Ansichten der Bruchstelle und des
beheizten Feldes ; Balken II

Bild
20 und 21



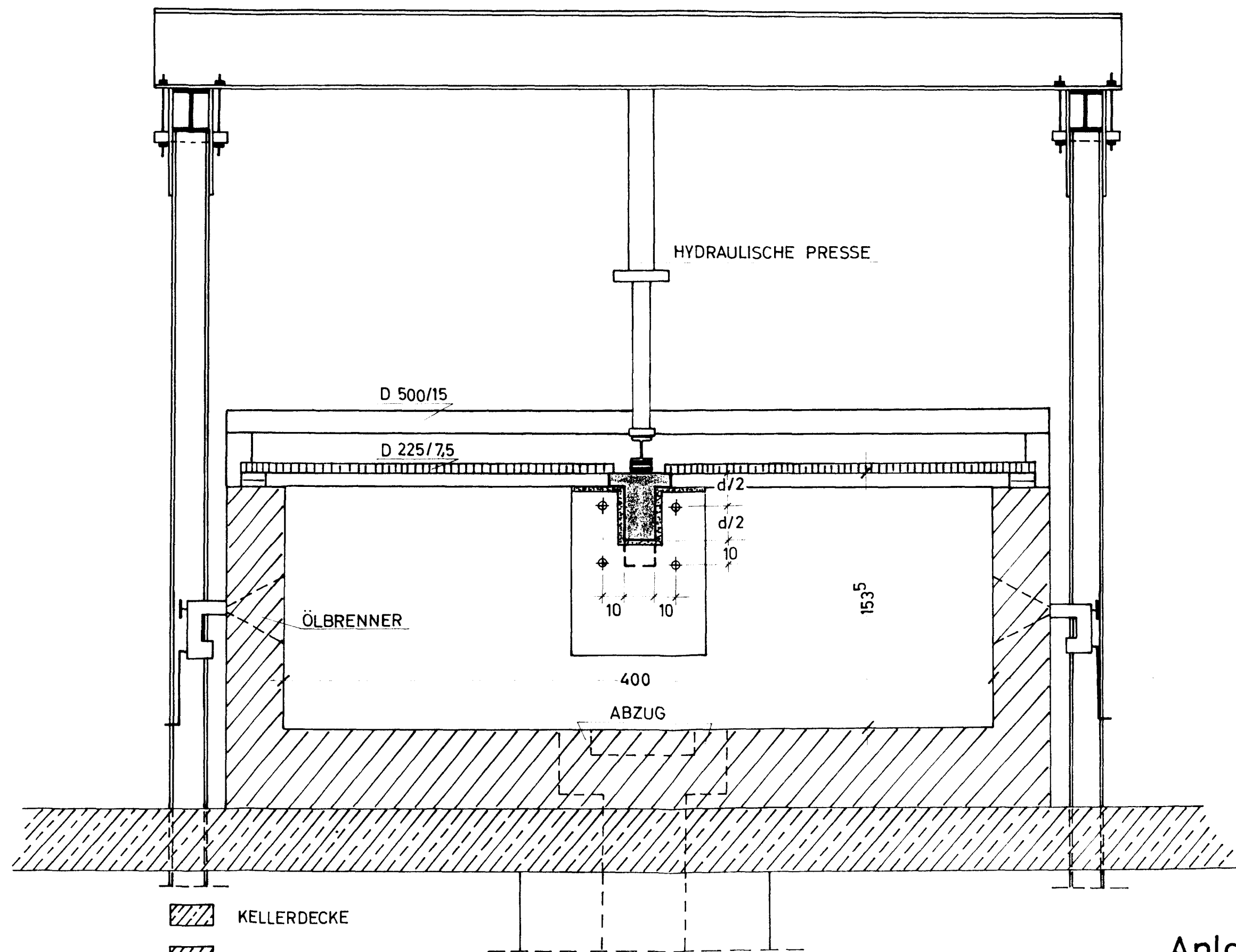
Gesamtansichten nach dem Brandversuch
Balken II

Bild
22 und 23



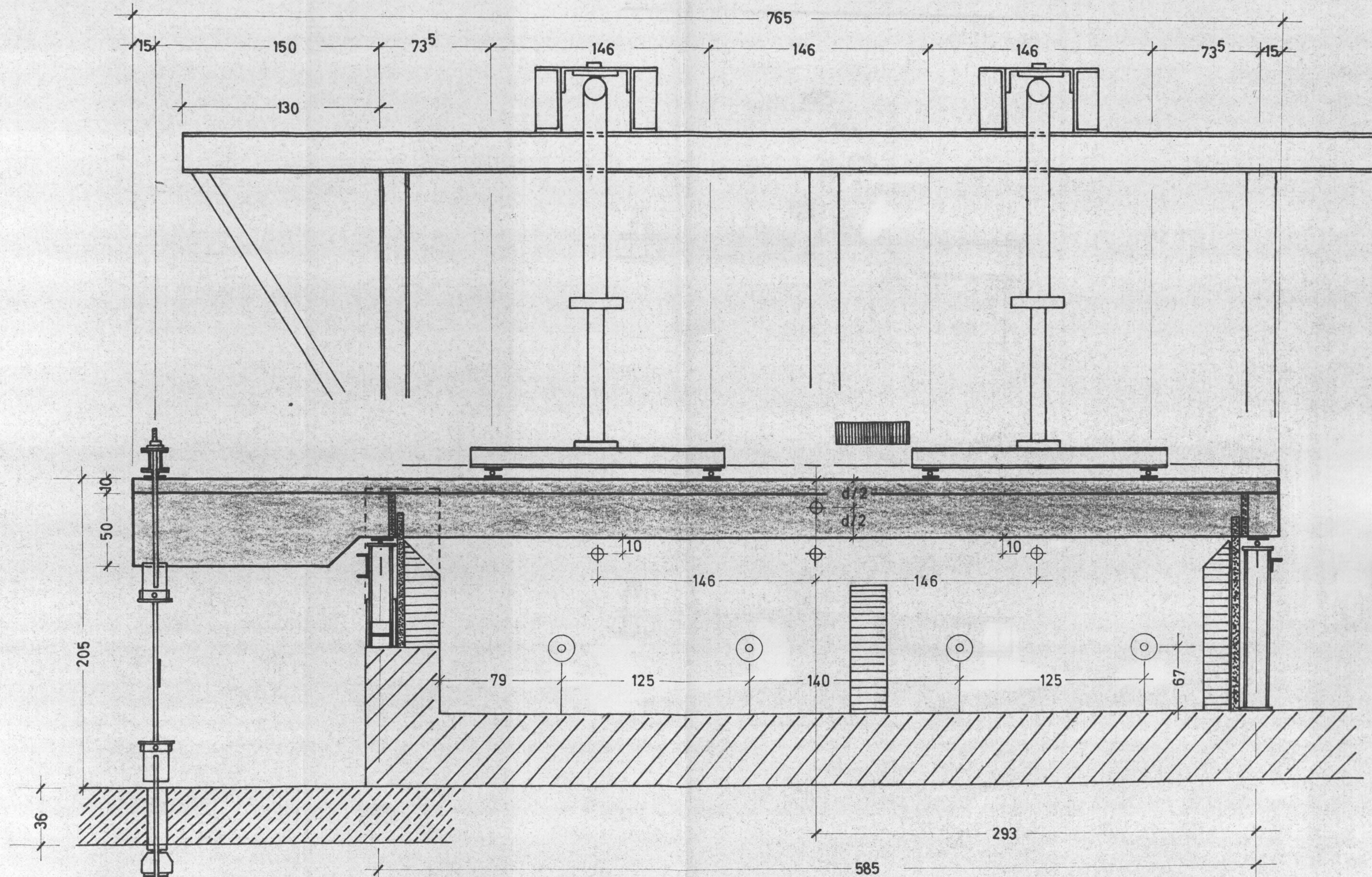
Zermürbter Beton in der Biegedruckzone
Balken III

Bild
24 und 25



Anlage 1.2

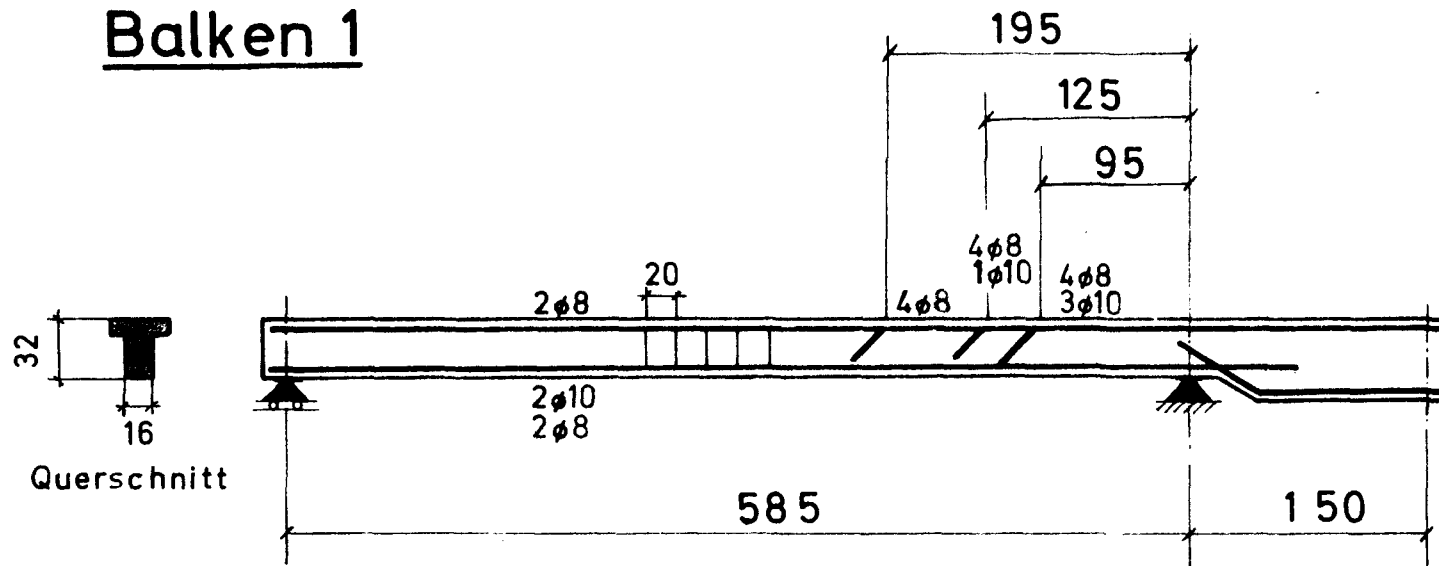
Durchlaufträger unter Feuerangriff
 VERSUCHAUFBAU
 QUERSCHNITT



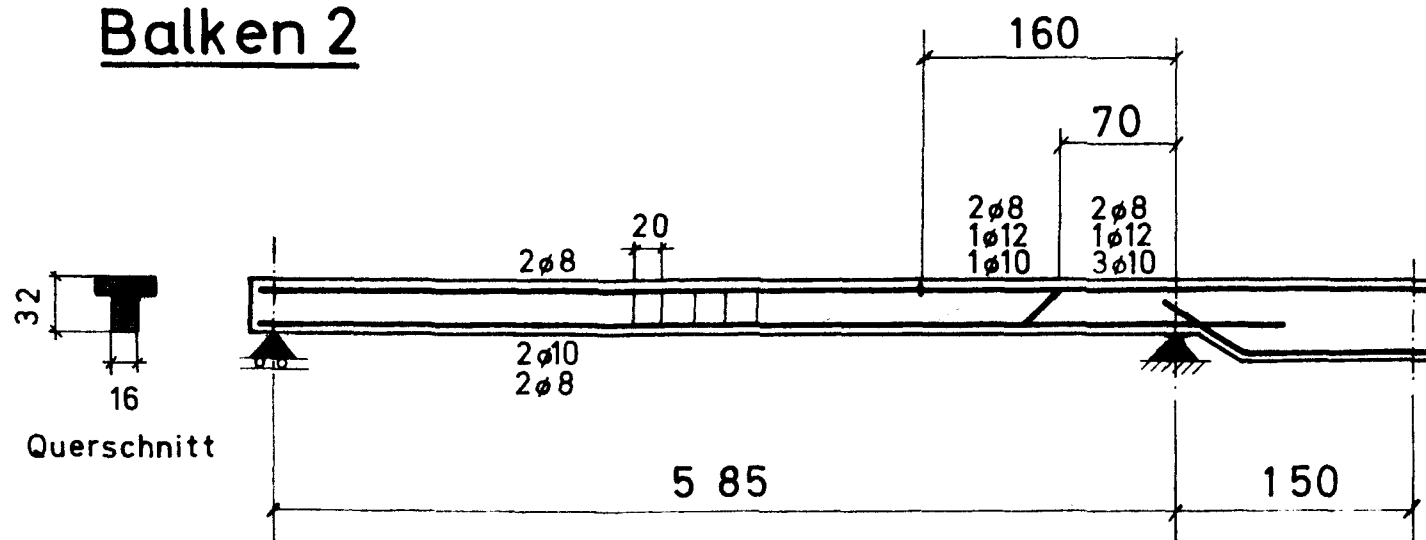
Anlage 1.1

Durchlaufträger unter Feuerangriff
VERSUCHSAUFBAU
LÄNGSSCHNITT

Balken 1



Balken 2

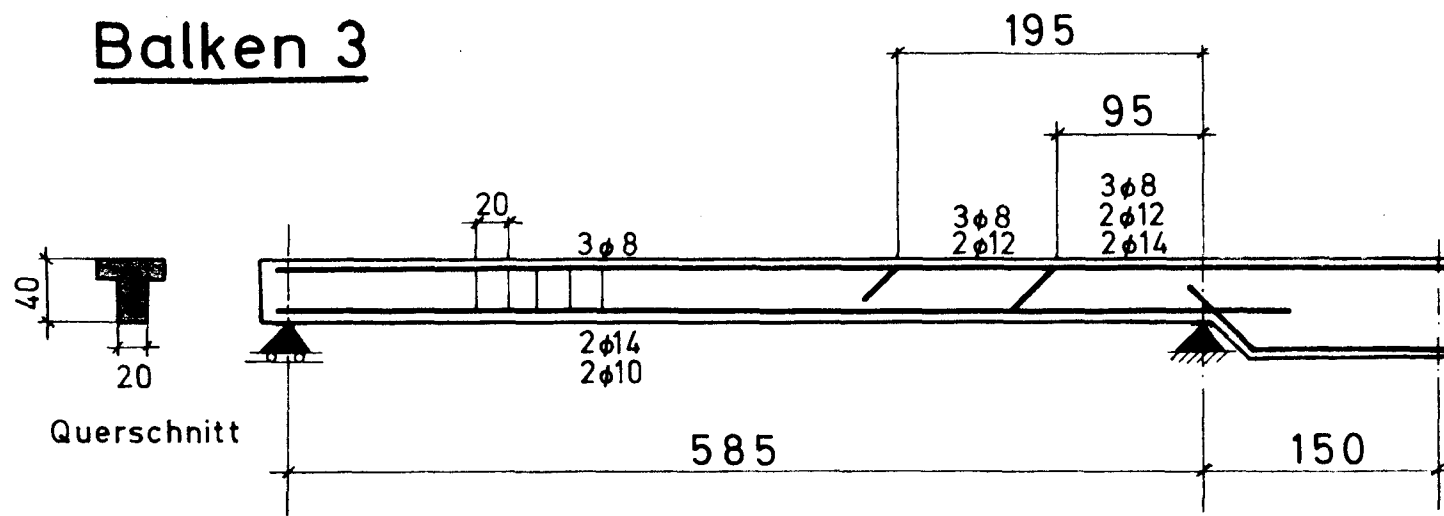


Stahlgüte: Rippentorstahl St IIIb

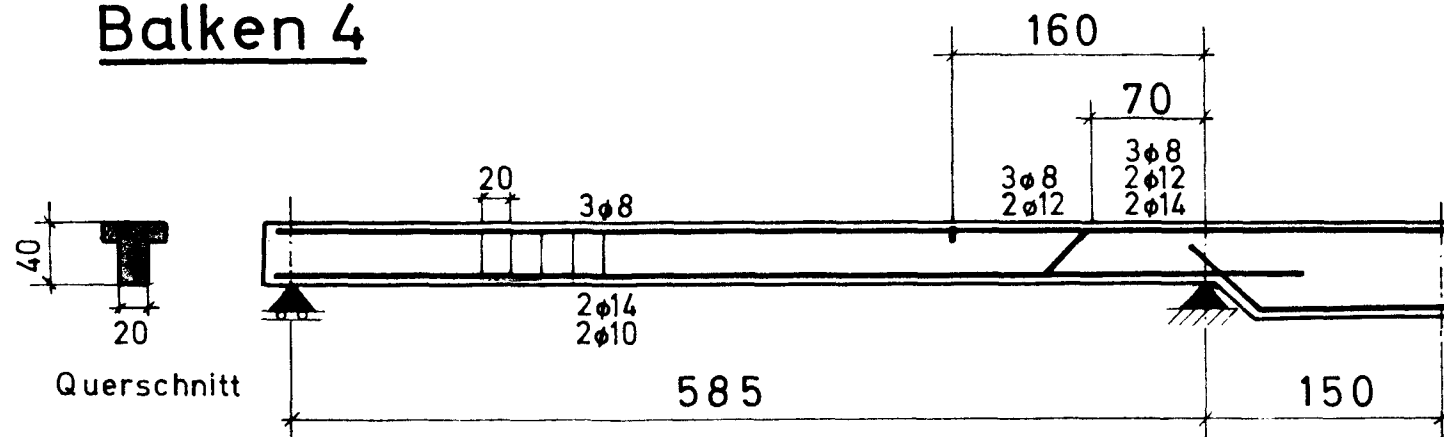
Anlage 2.1

Durchlaufträger unter Feuerangriff
Balken 1 und 2 $b/d=16/32$ [cm]
Bewehrungsführung

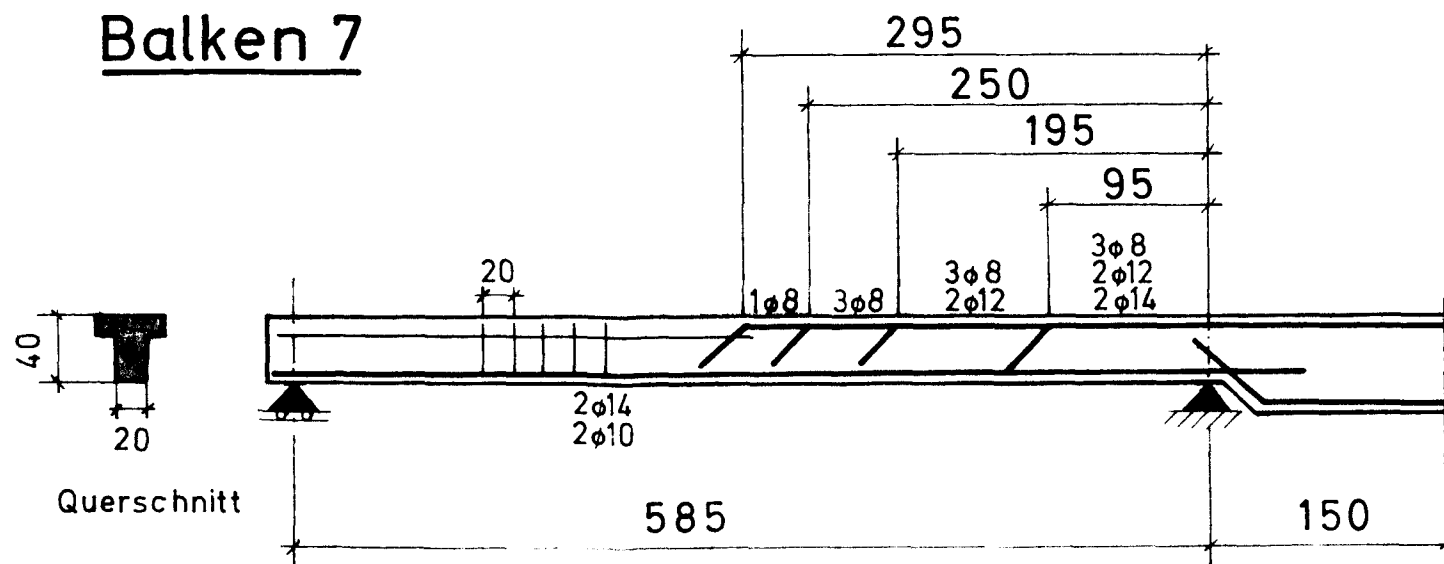
Balken 3



Balken 4



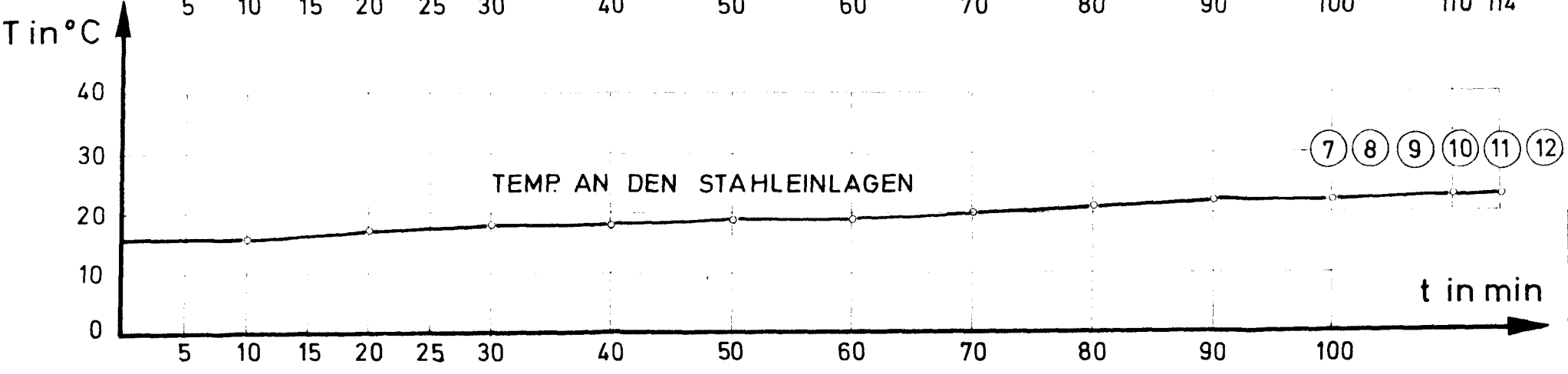
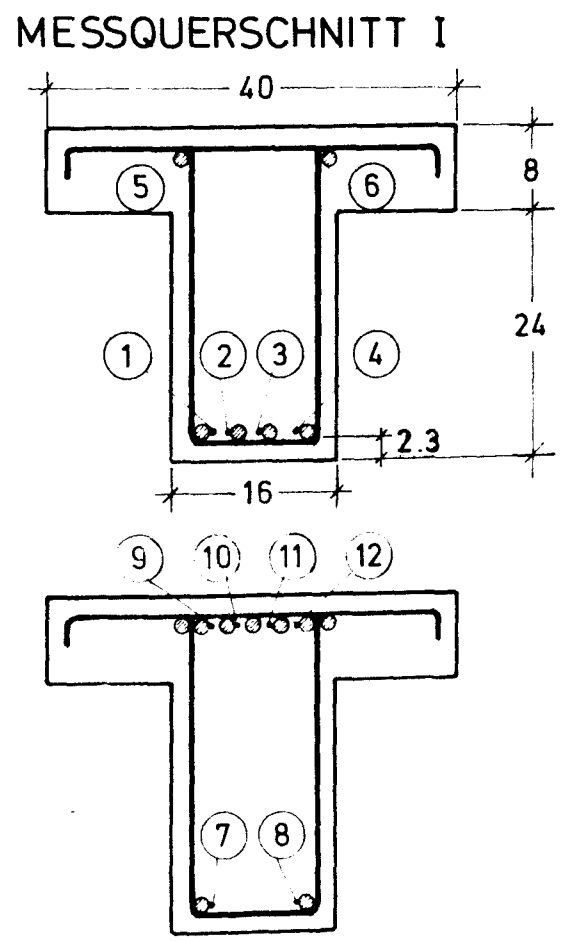
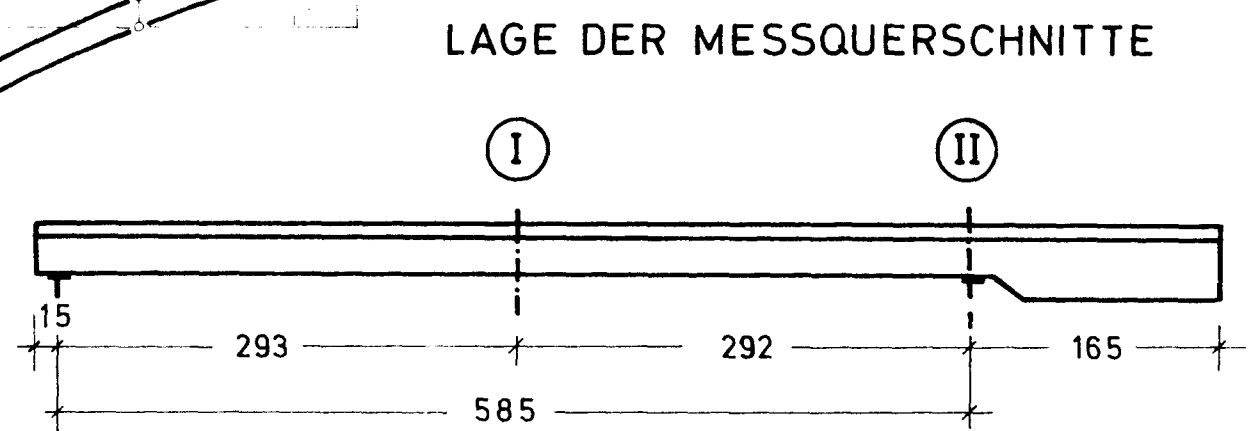
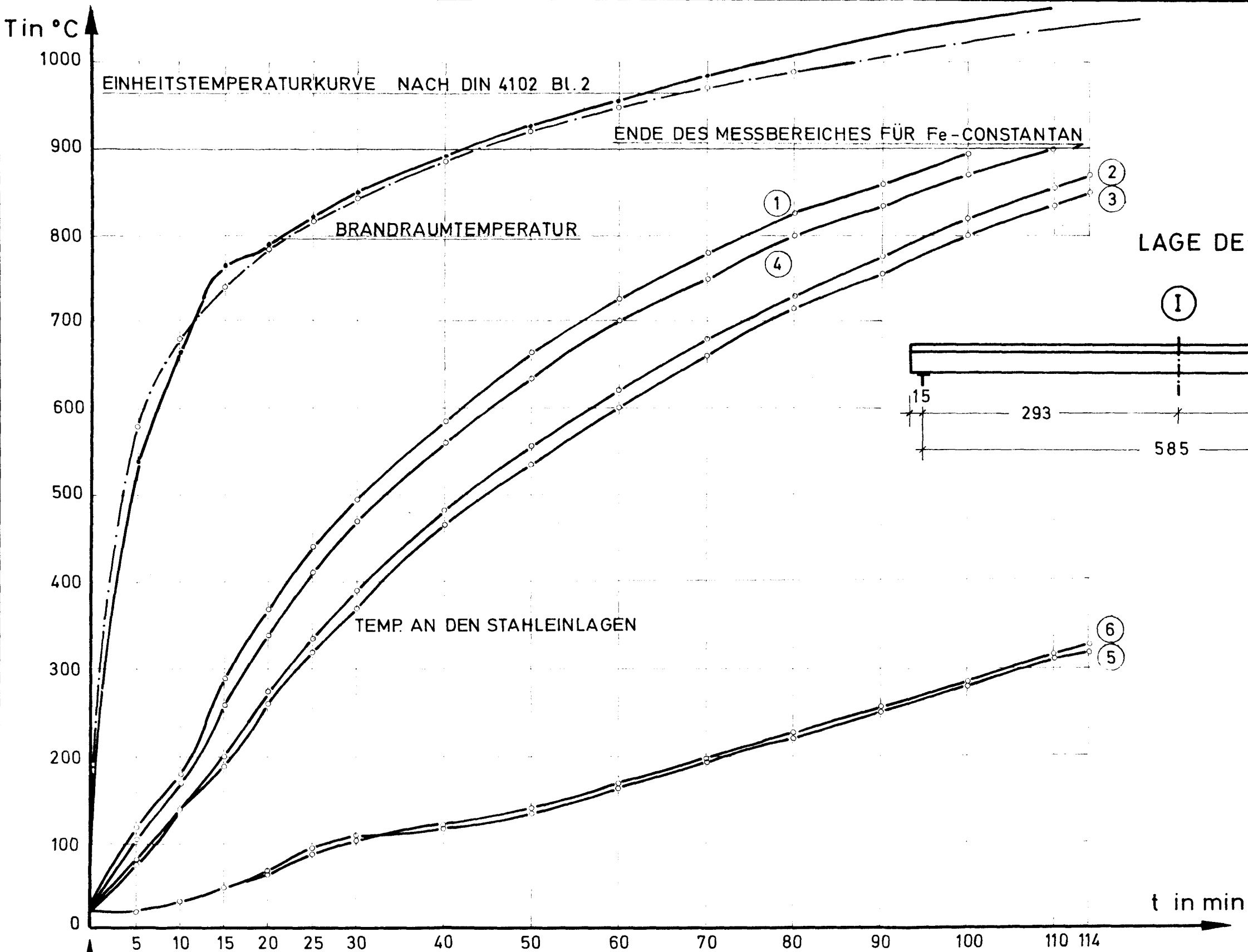
Balken 7

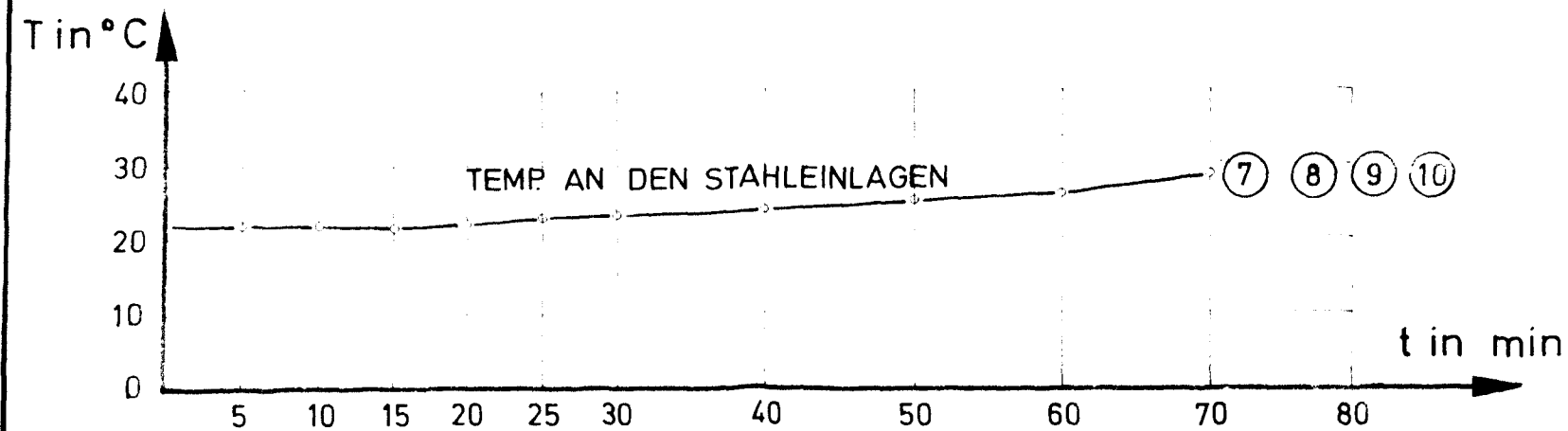
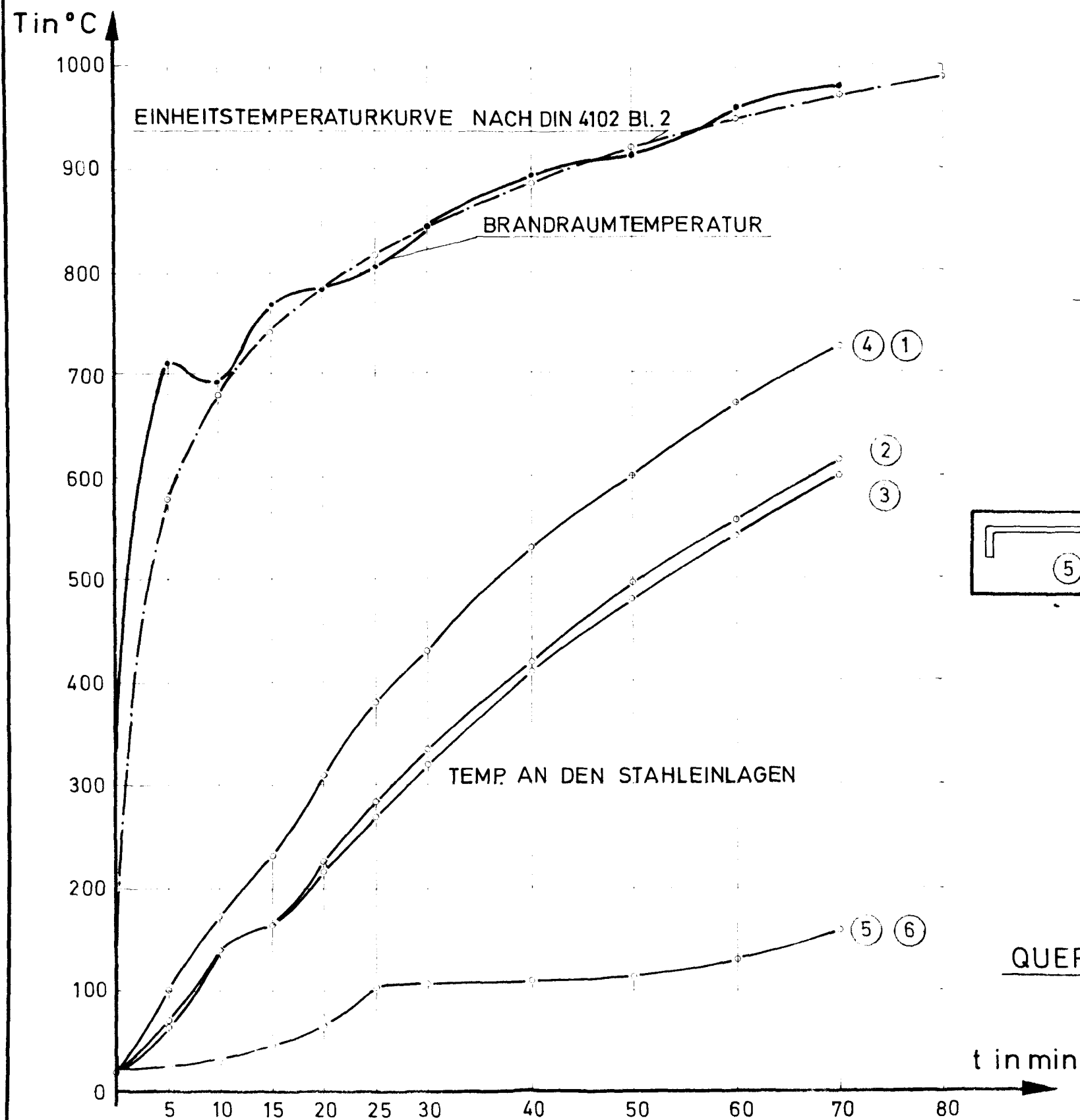


Anlage 2.2

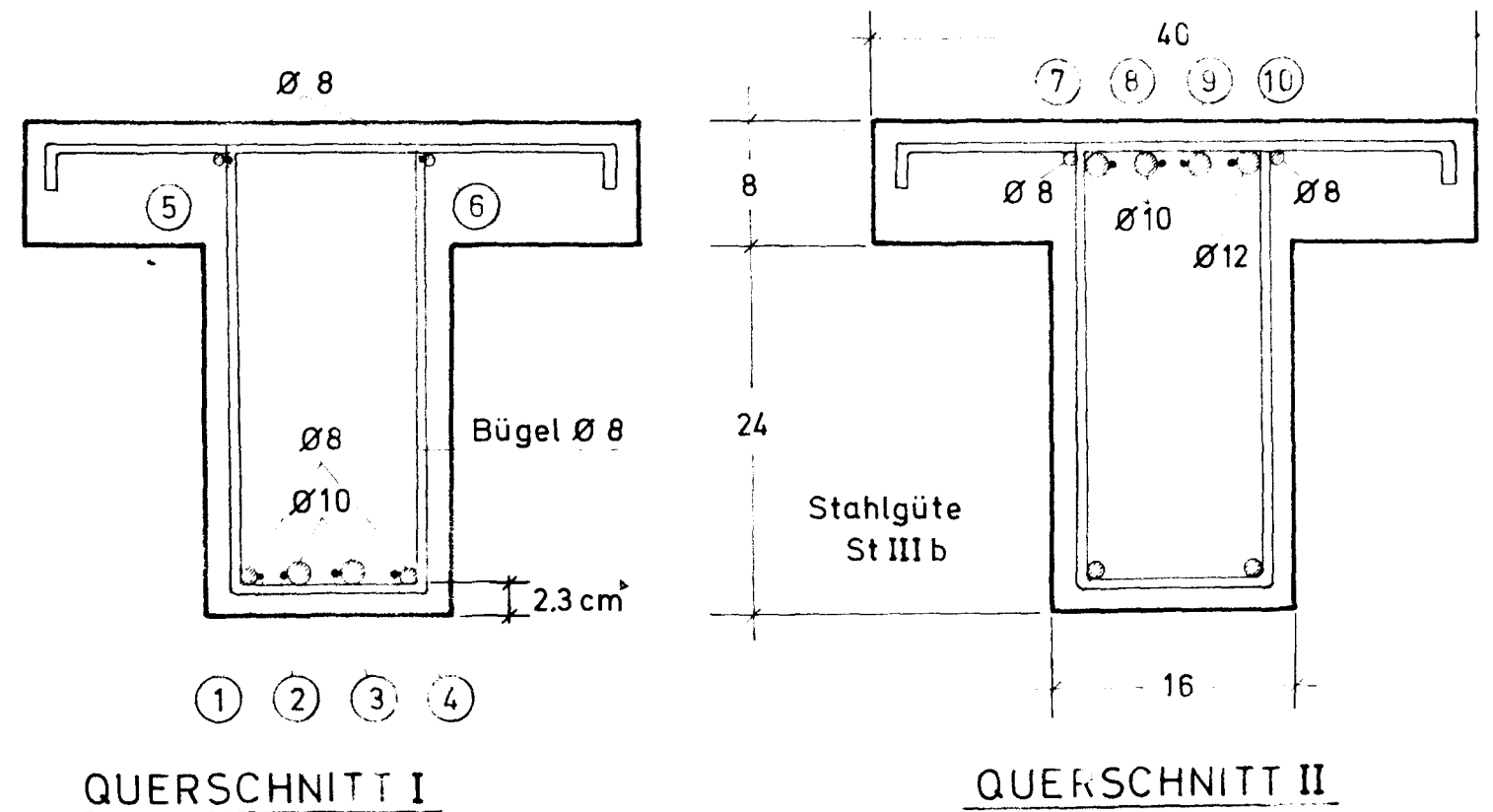
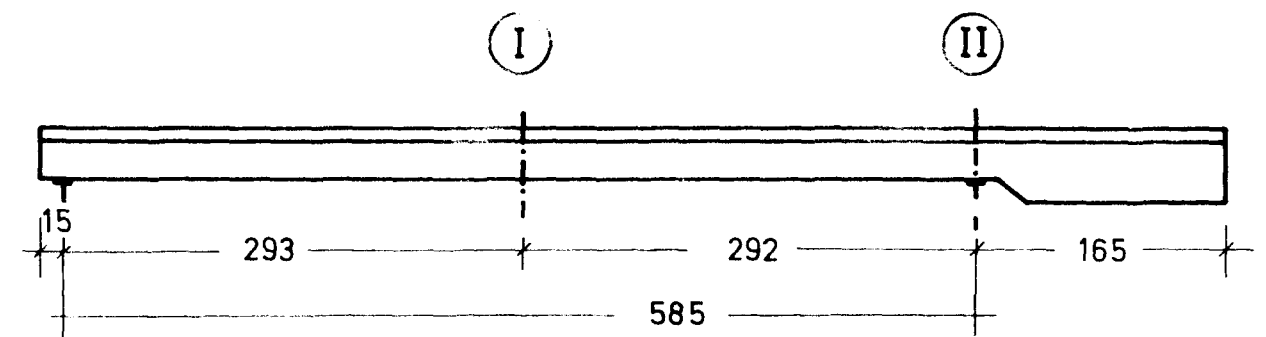
Stahlgüte: Rippentorstahl St III b

Durchlaufträger unter Feuerangriff
Balken 3, 4 und 7 $b/d=20/40$ [cm]
Bewehrungsführung



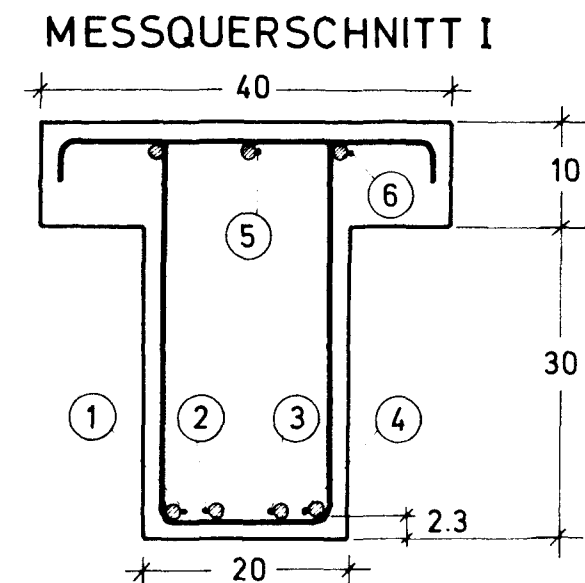
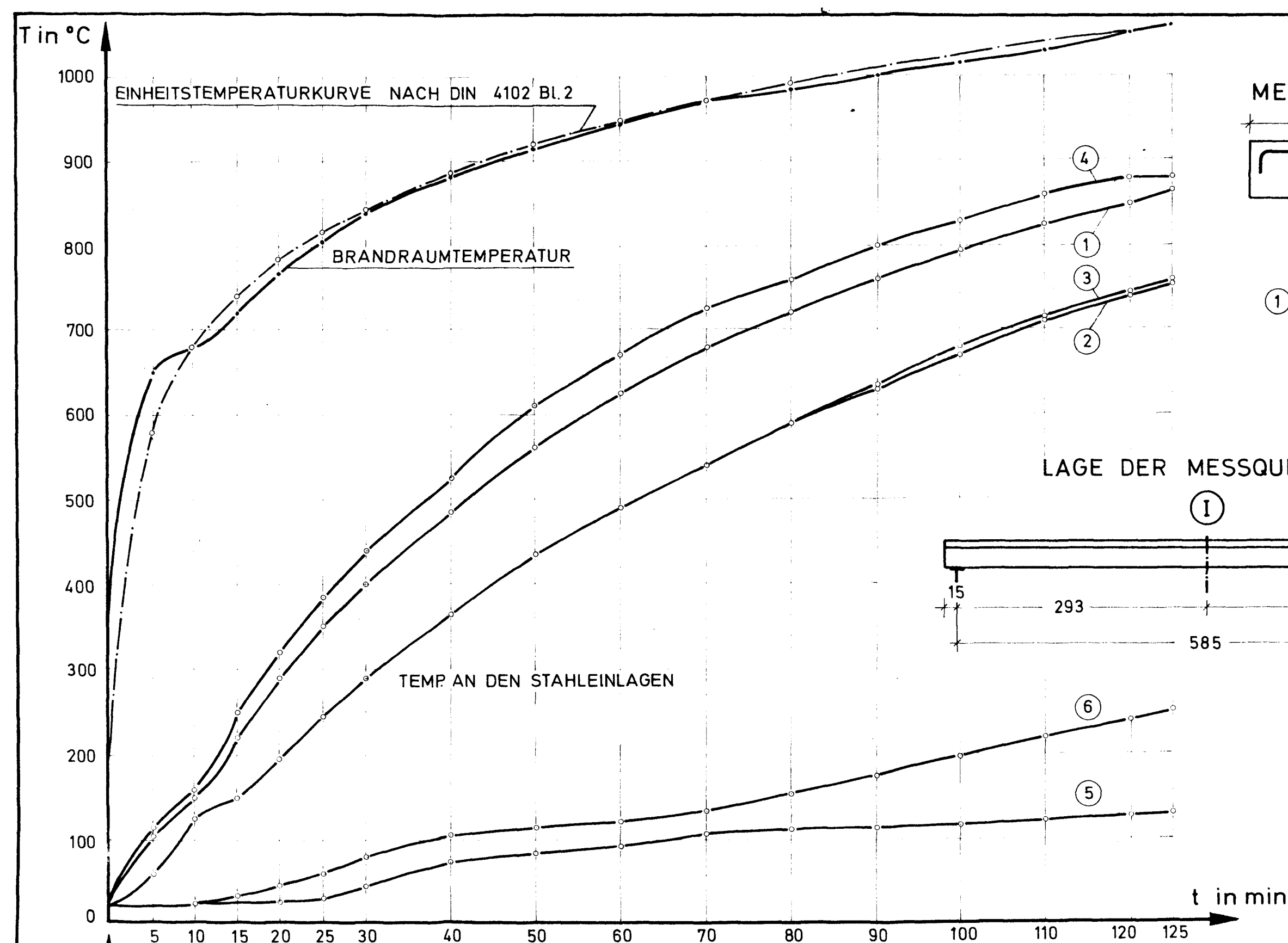


LAGE DER MESSQUERSCHNITTE

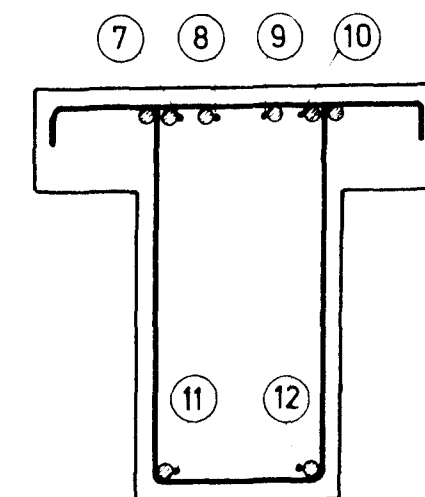
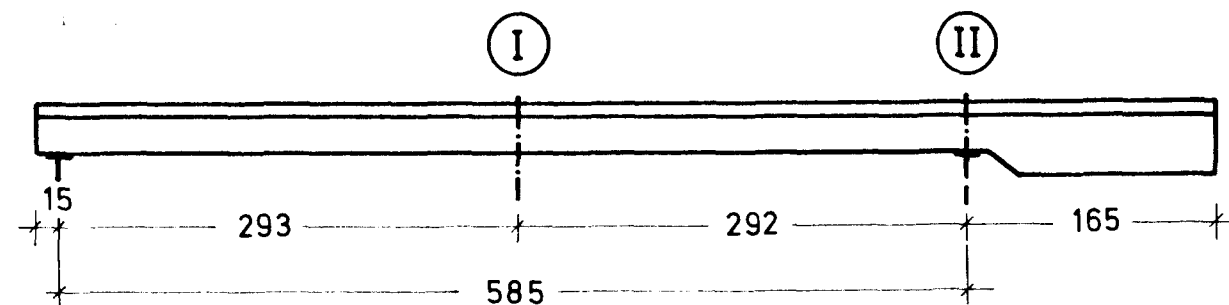


Anlage 3.2

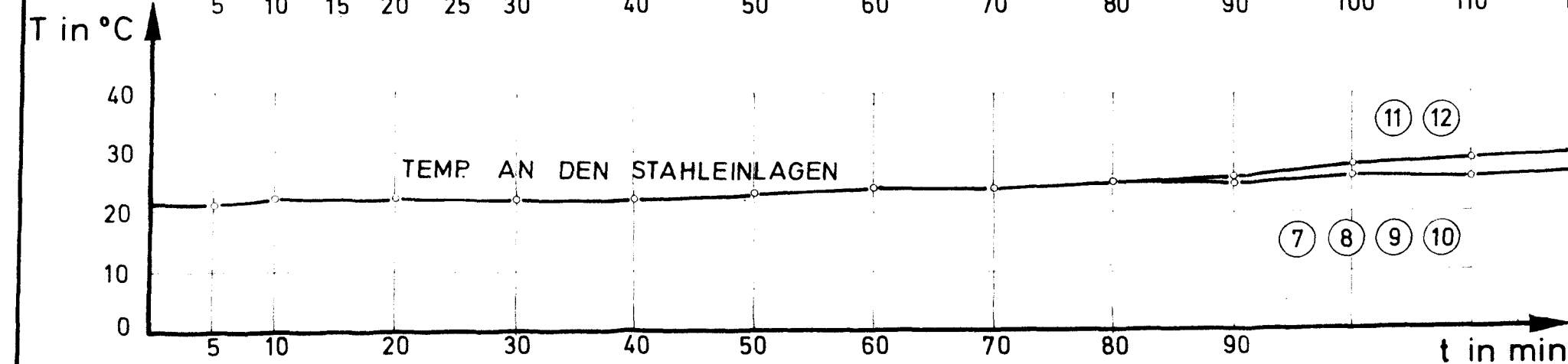
Durchlaufträger unter Feuerangriff
Balken 2 b/d = 16/32 (cm)
Temperaturmeßergebnisse



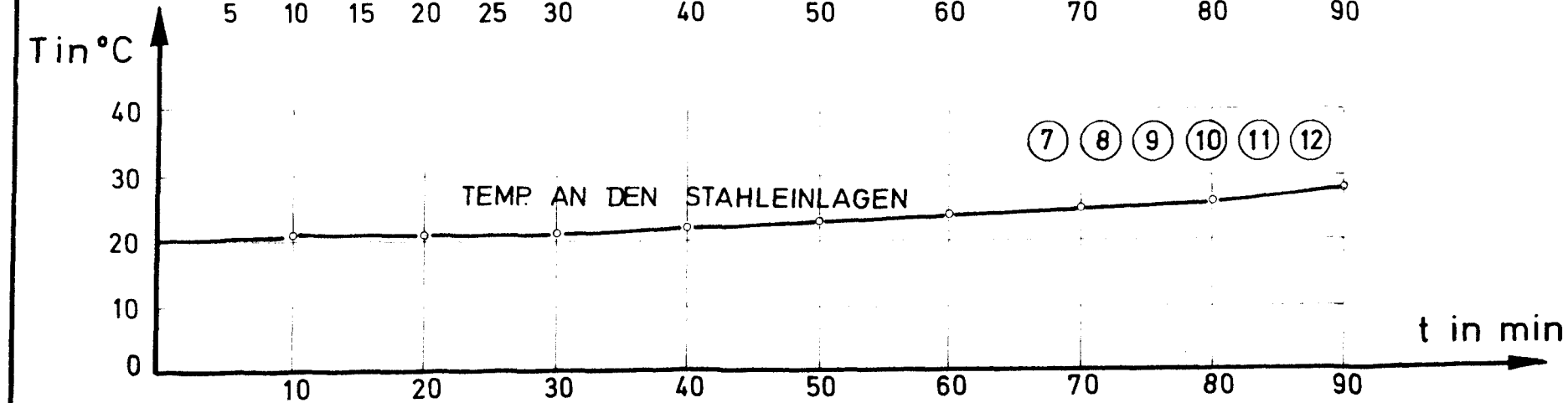
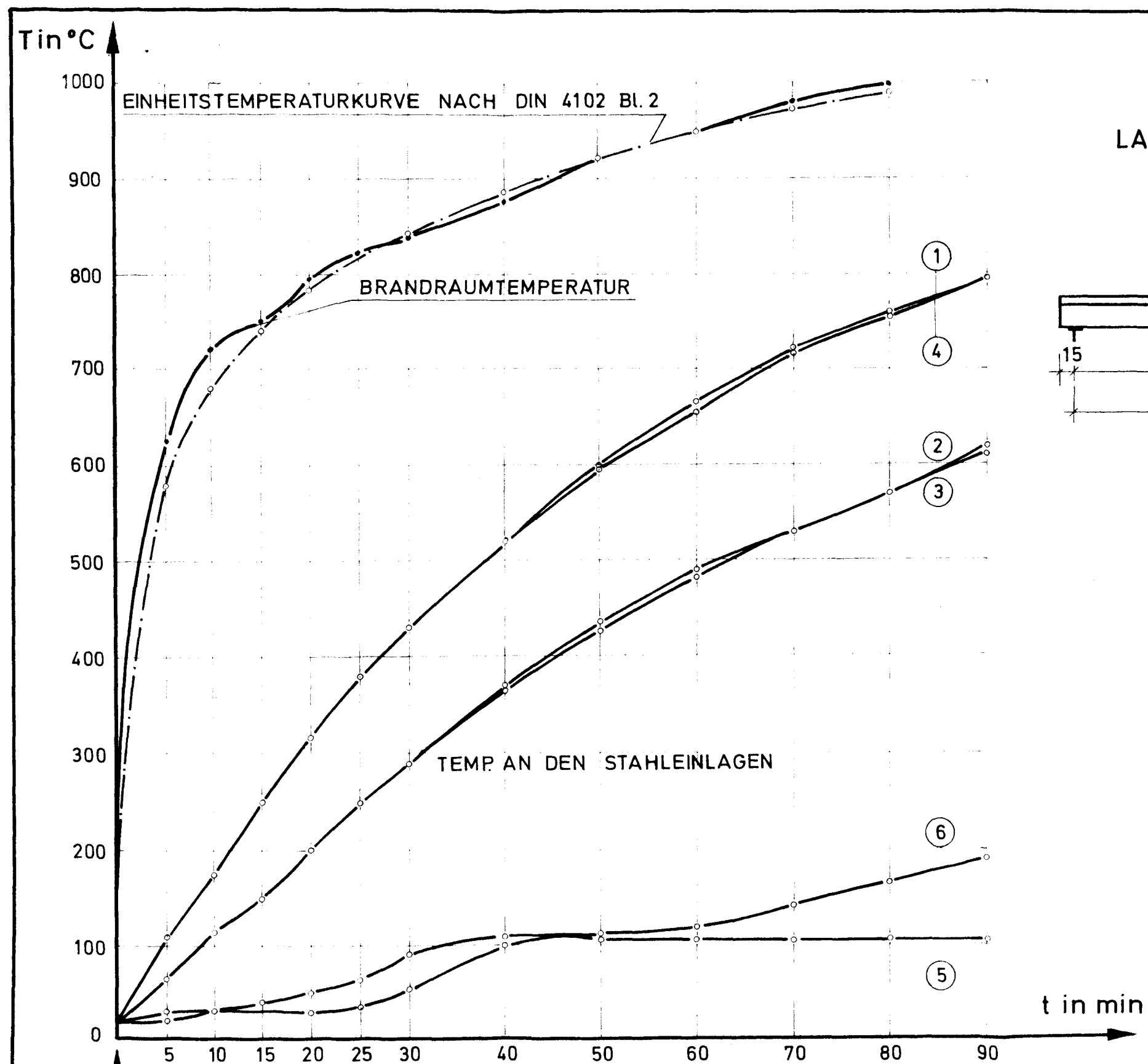
LAGE DER MESSQUERSCHNITTE



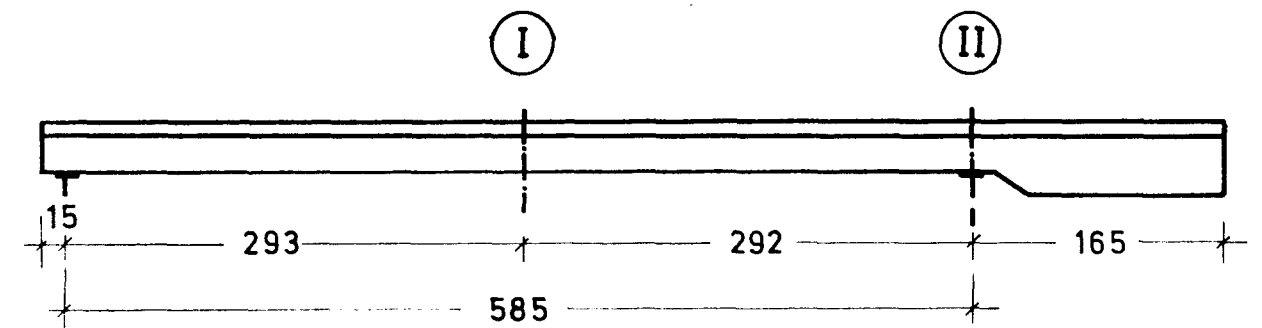
Anlage 3.3



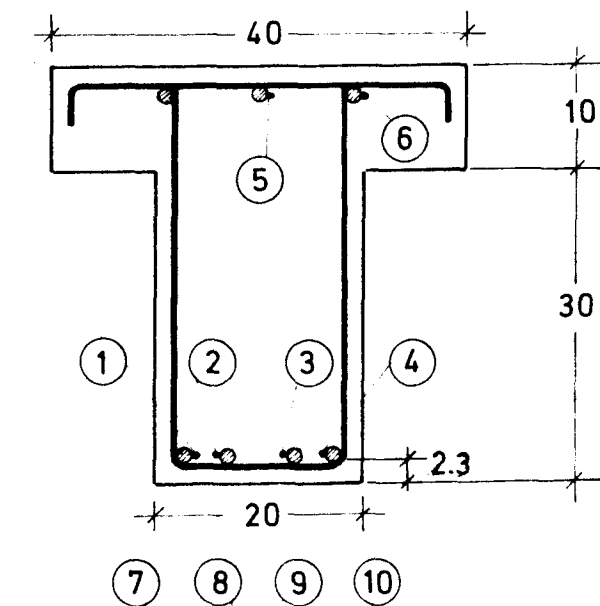
Durchlaufträger unter Feuerangriff
Balken 3 b/d=20/40
Temperaturmeßergebnisse



LAGE DER MESSQUERSCHNITTE



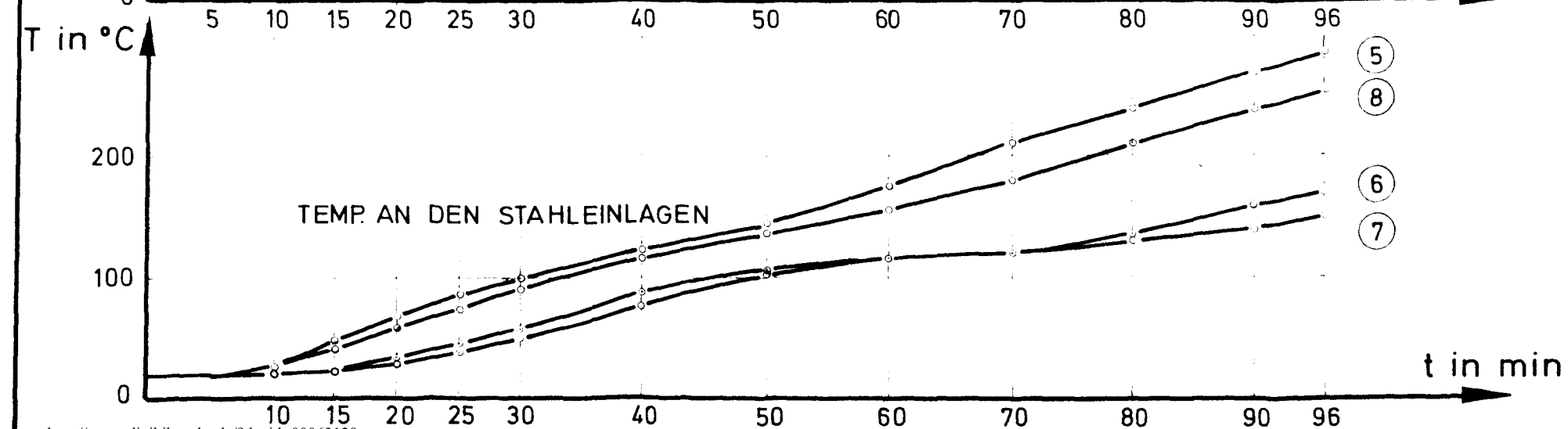
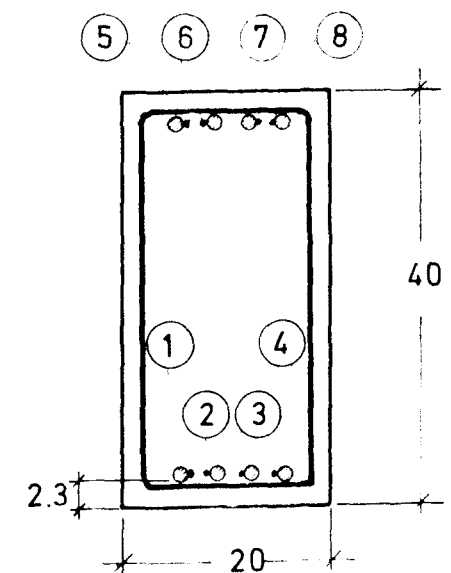
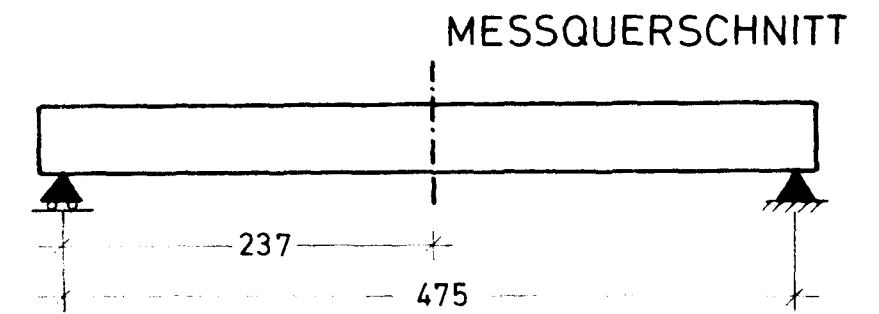
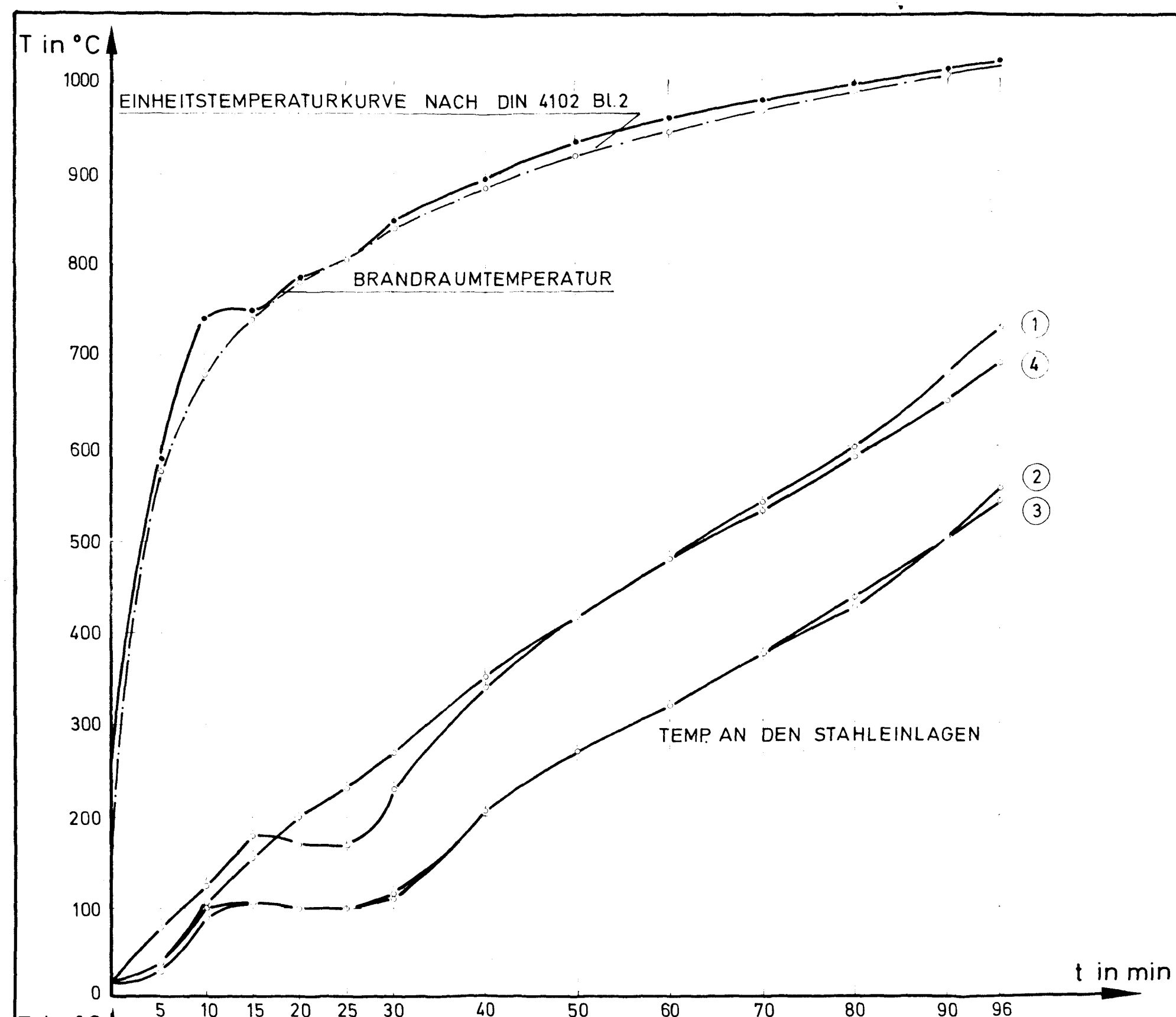
MESSQUERSCHNITT I



MESSQUERSCHNITT II

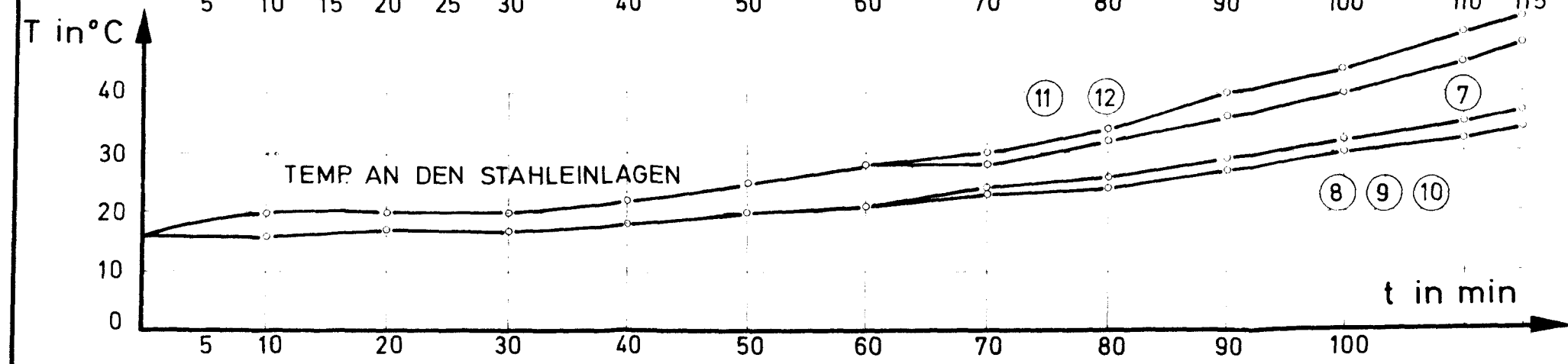
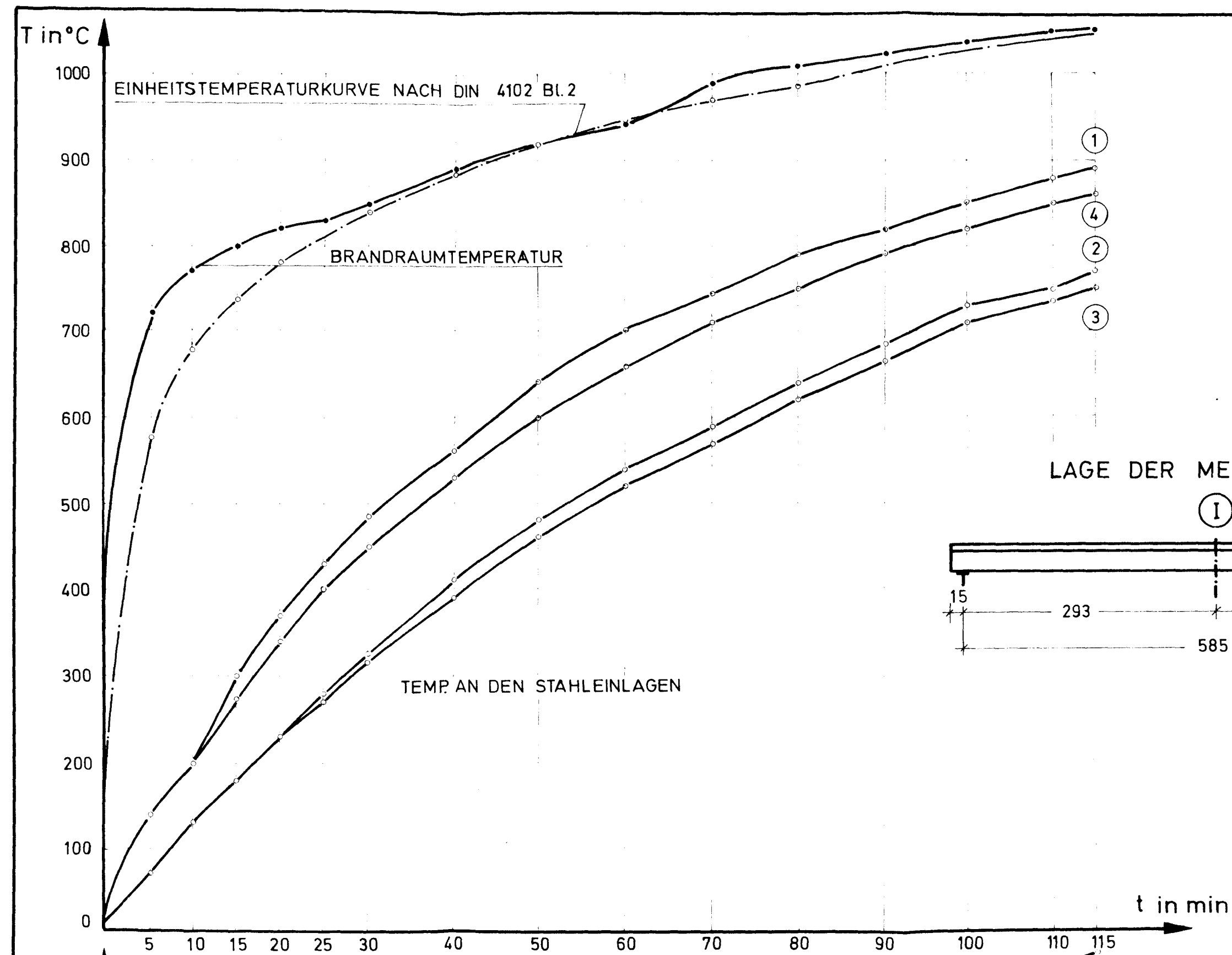
Anlage 3.4

Durchlaufträger unter Feuerangriff
Balken 4 b/d=20/40
Temperaturmeßergebnisse



Anlage 3.5

Durchlaufträger unter Feuerangriff
 Balken 6 $b/d=20/40$ cm
 (Statisch bestimmt)
 Temperaturmeßergebnisse



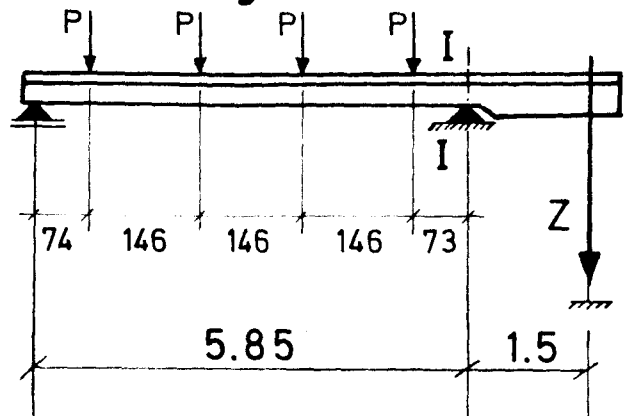
Anlage 3.6

Durchlaufträger unter Feuerangriff

Balken 7 $b/d=20/40$

Temperaturmeßergebnisse

stat. System



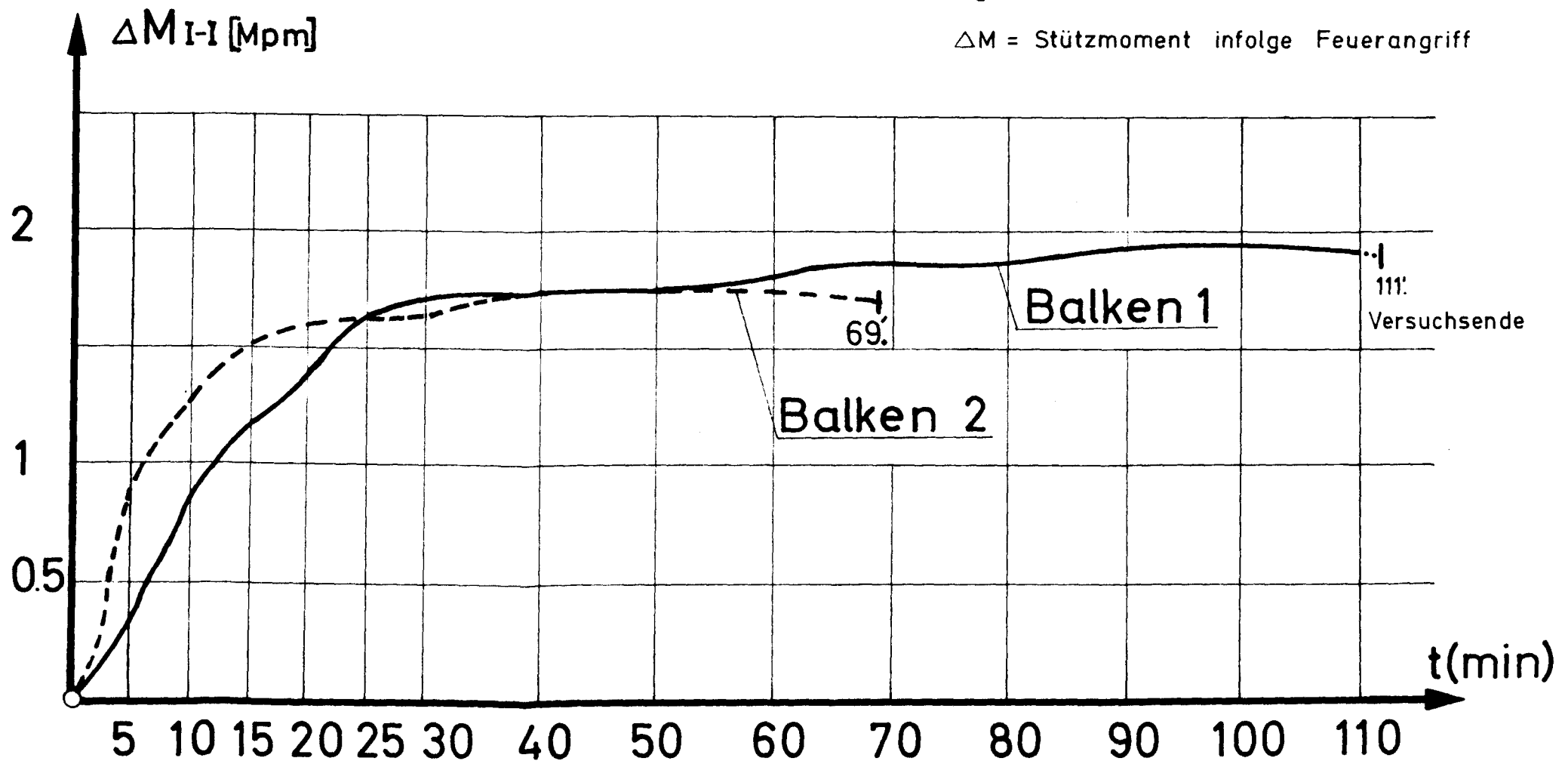
Stützmoment $M_{I-I} (M_Q + \Delta M)$

Zeit	t=0	t=40	t=90
Balken 2	2.60	4.36	—
Balken 1	2.60	4.36	4.54

 Maximum

M_Q = Stützmoment infolge äußerer Lasten

ΔM = Stützmoment infolge Feuerangriff

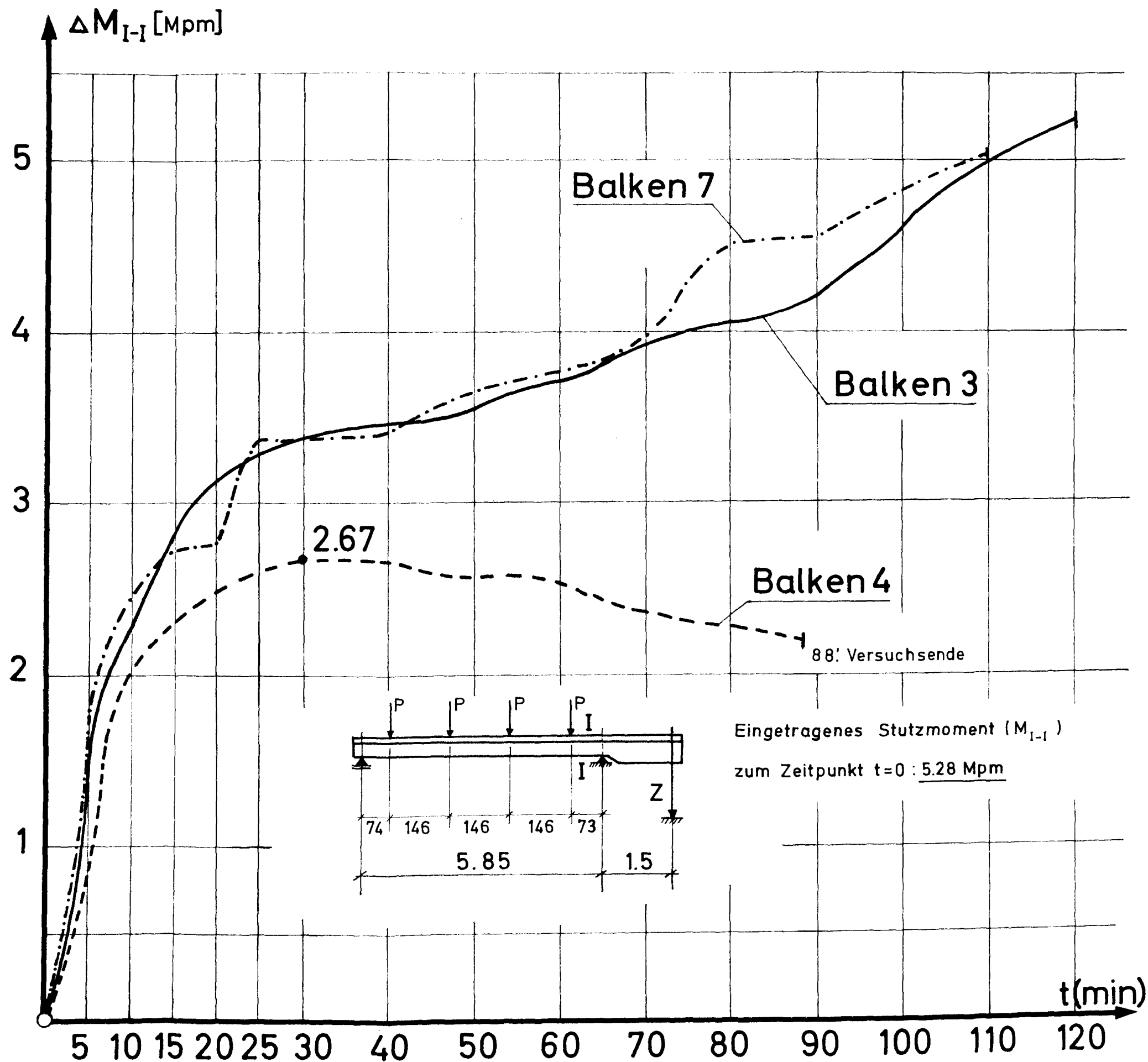


Anlage 4.1

Durchlaufträger unter Feuerangriff

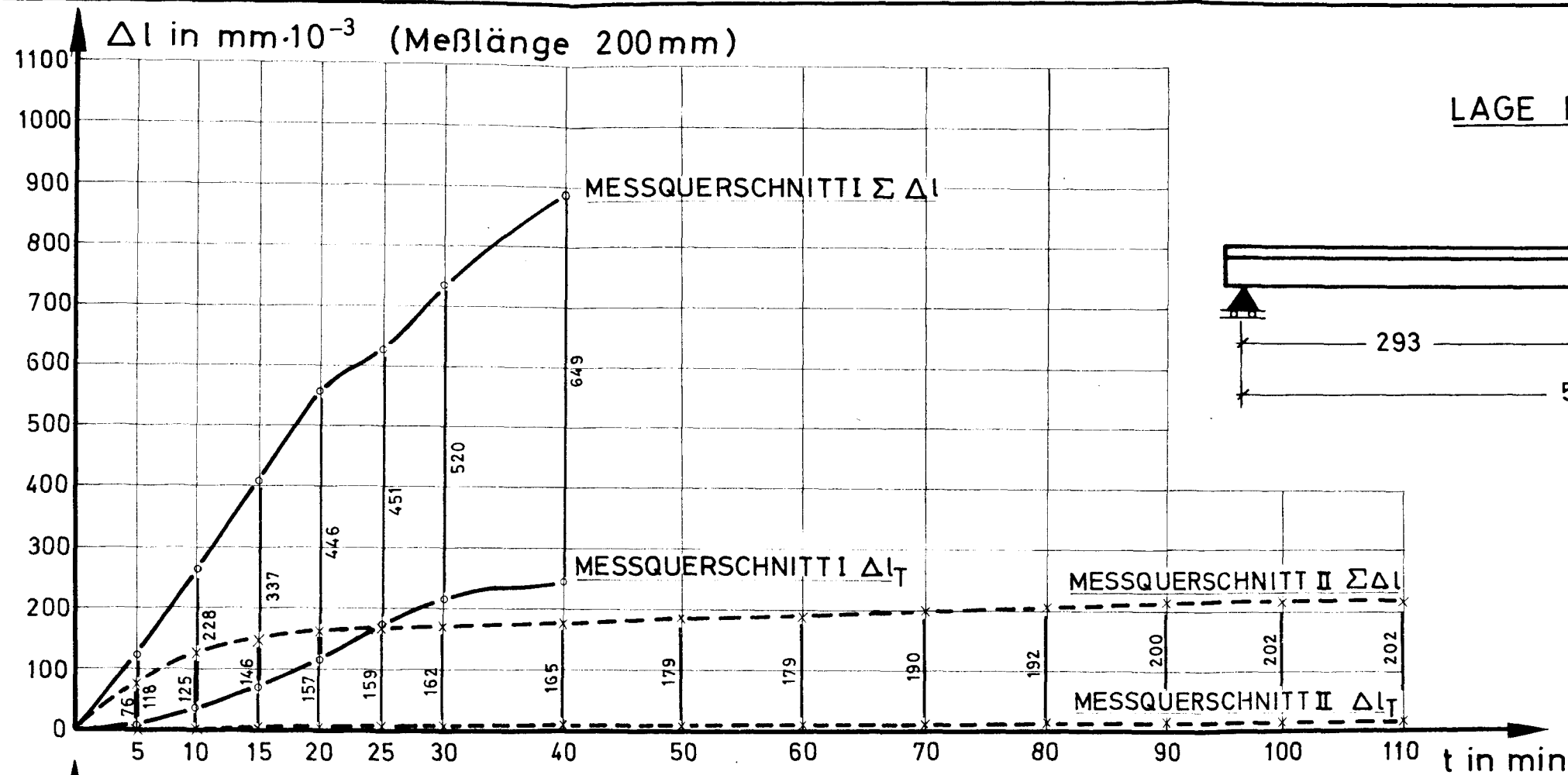
Balken 1 und 2 $b/d = 16/32$ [cm]

ΔM_{I-I} infolge Feuerangriff

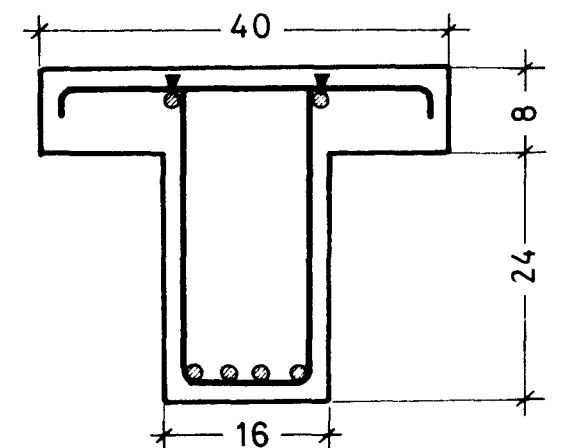
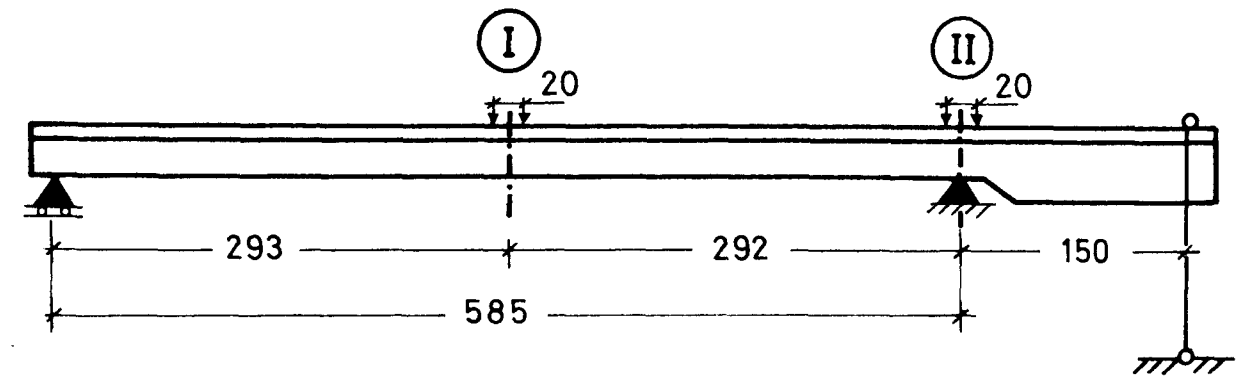


Anlage 4.2

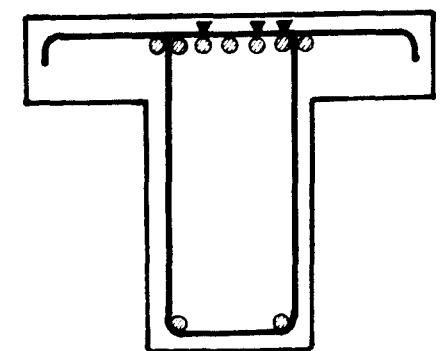
Durchlaufträger unter Feuerangriff
 Balken 3,4 und 7 $b/d=20/40$ [cm]
 ΔM_{I-I} infolge Feuerangriff



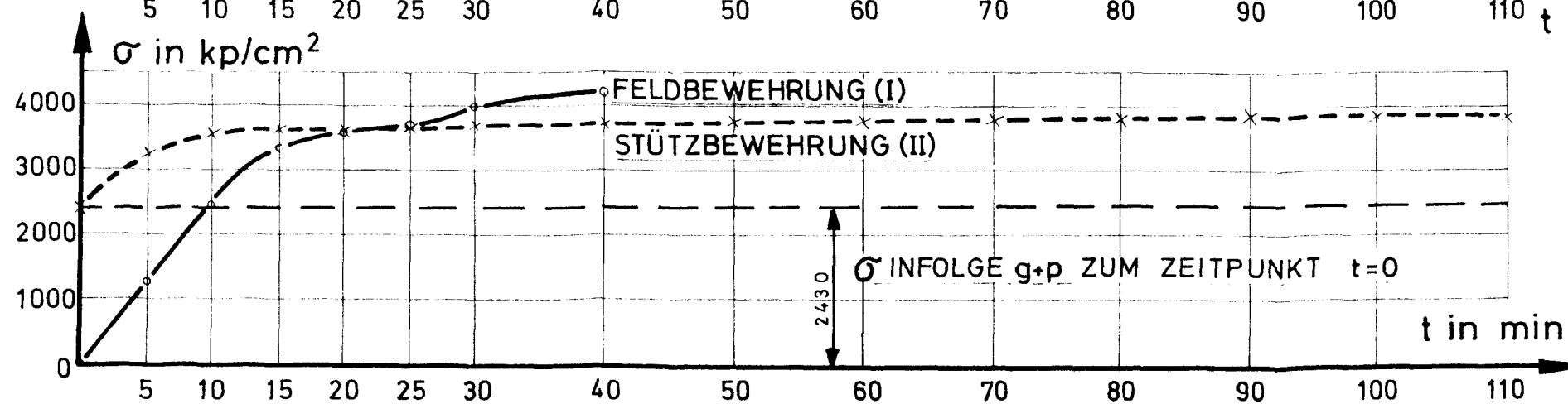
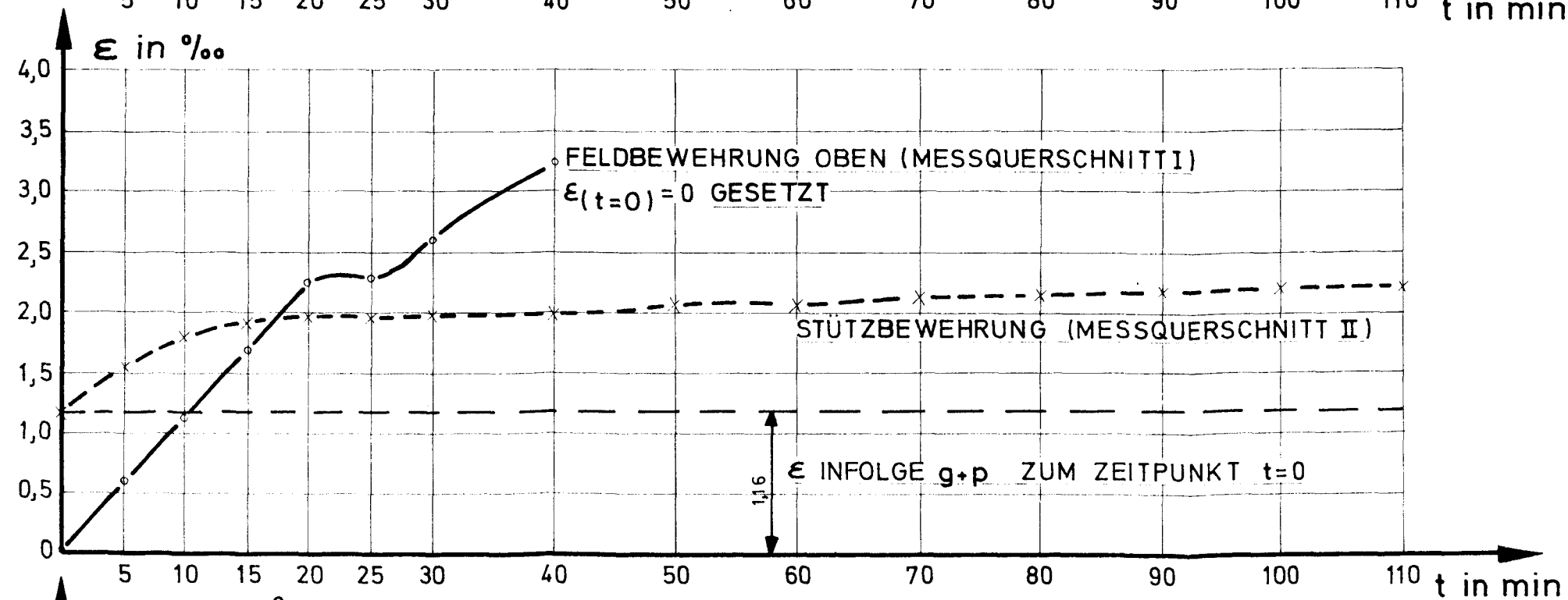
LAGE DER MESSQUERSCHNITTE



MESSQUERSCHNITT I

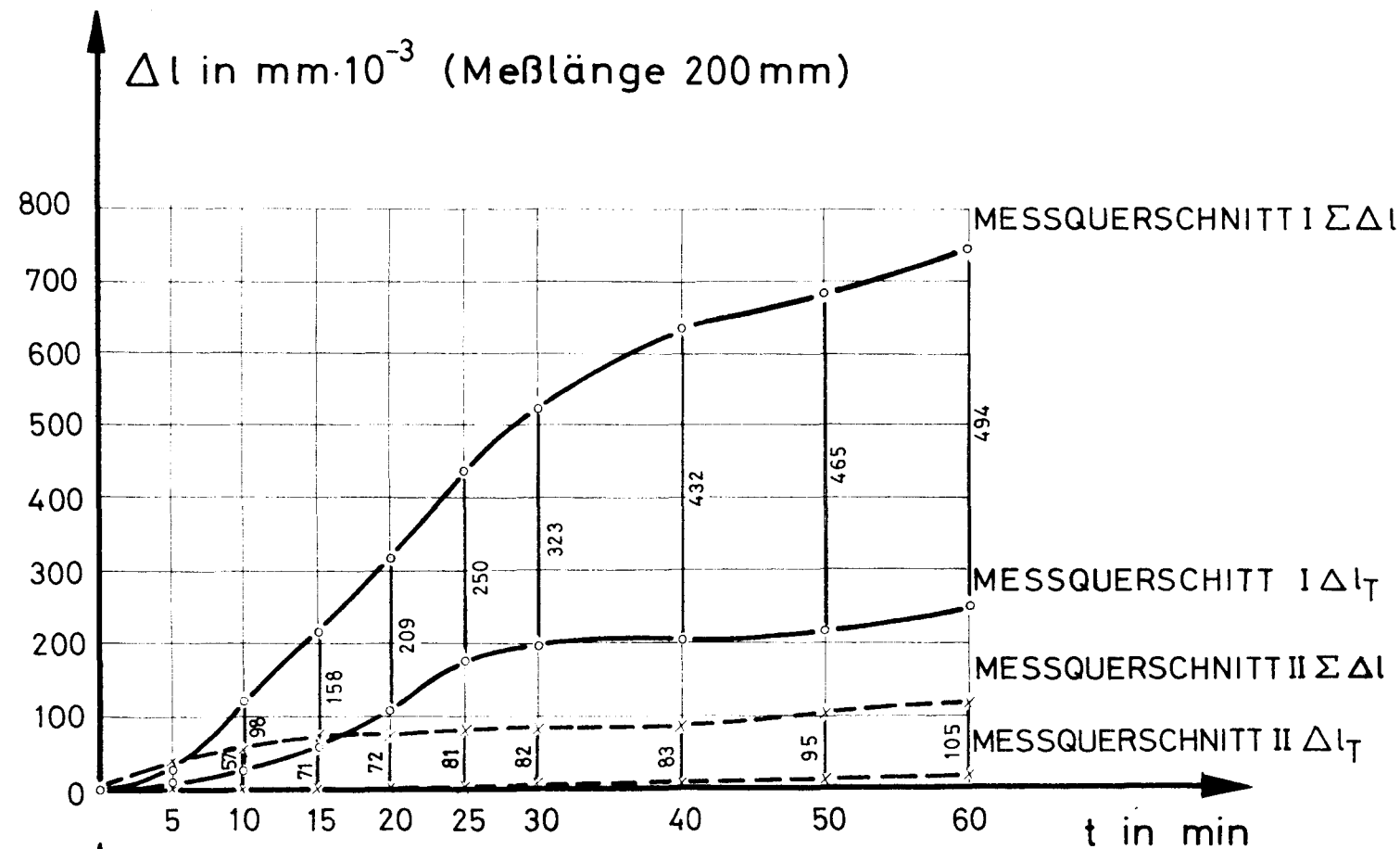


MESSQUERSCHNITT II

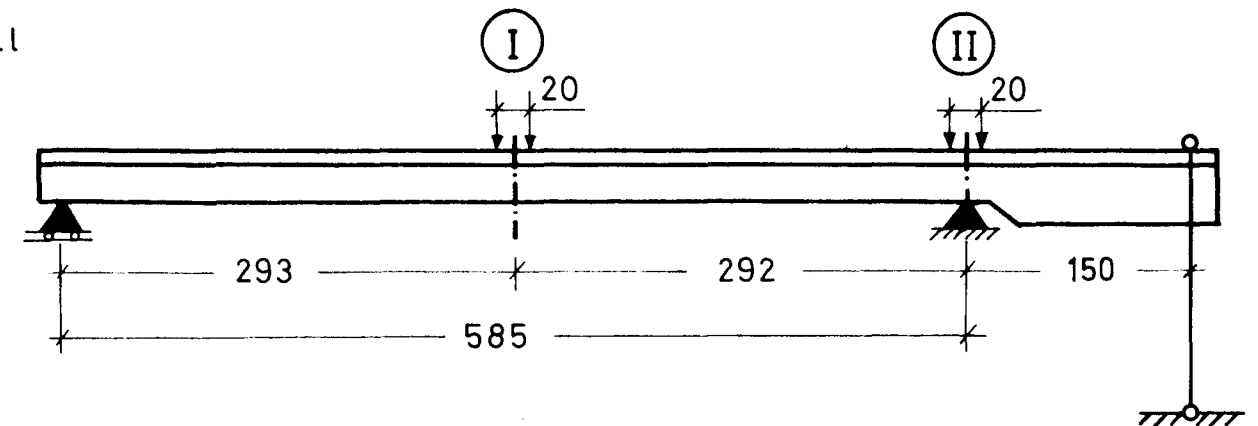


Anlage 5.1

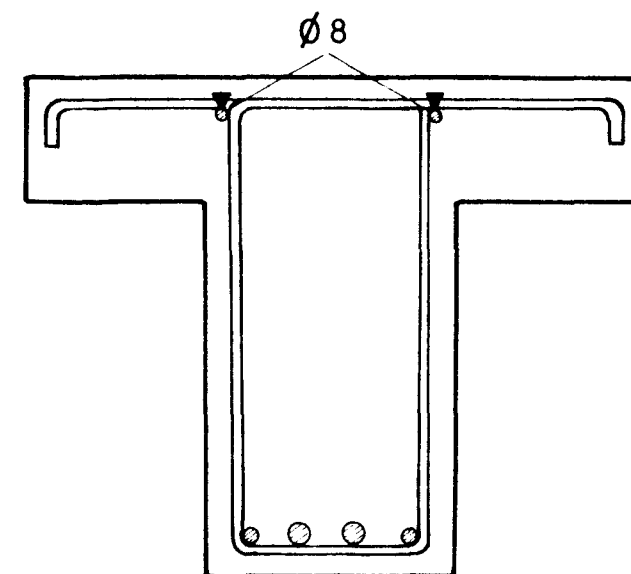
Durchlaufträger unter Feuerangriff
Balken 1 $b/d = 16/32$ (cm)
Dehnungsmeßergebnisse



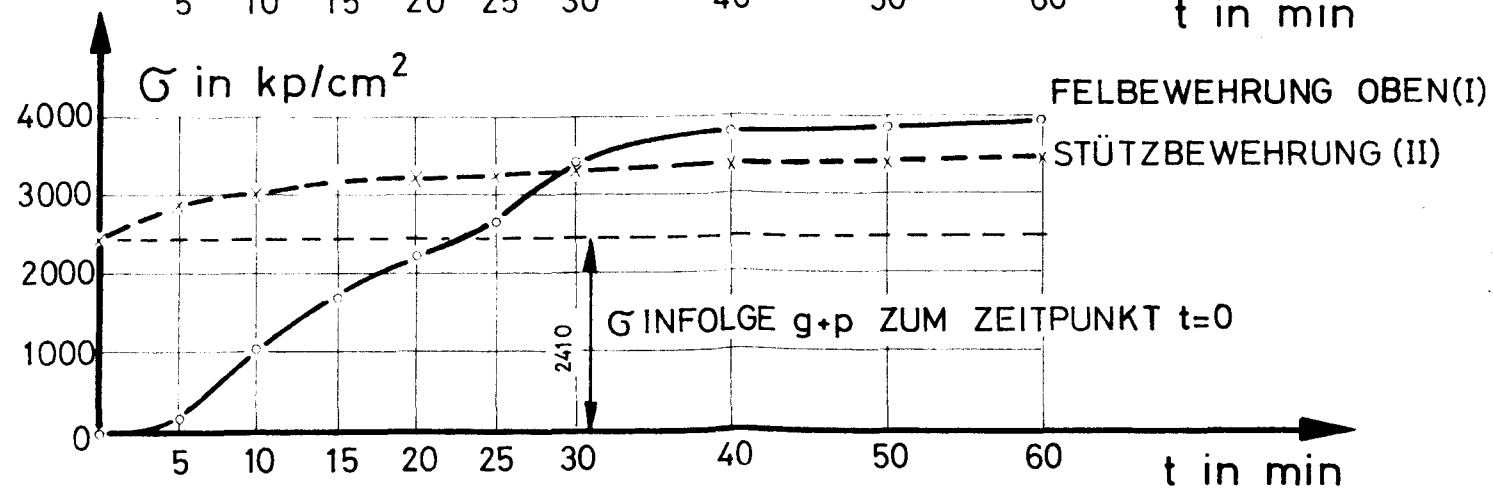
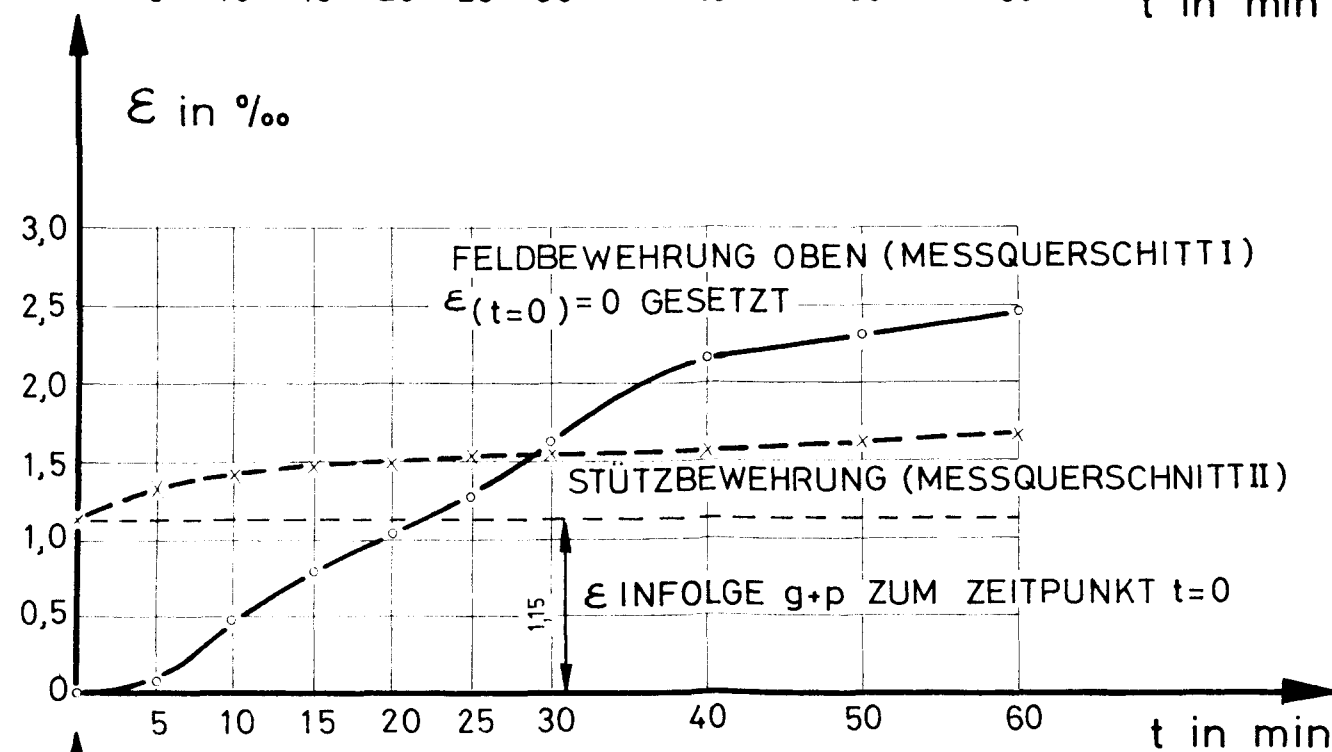
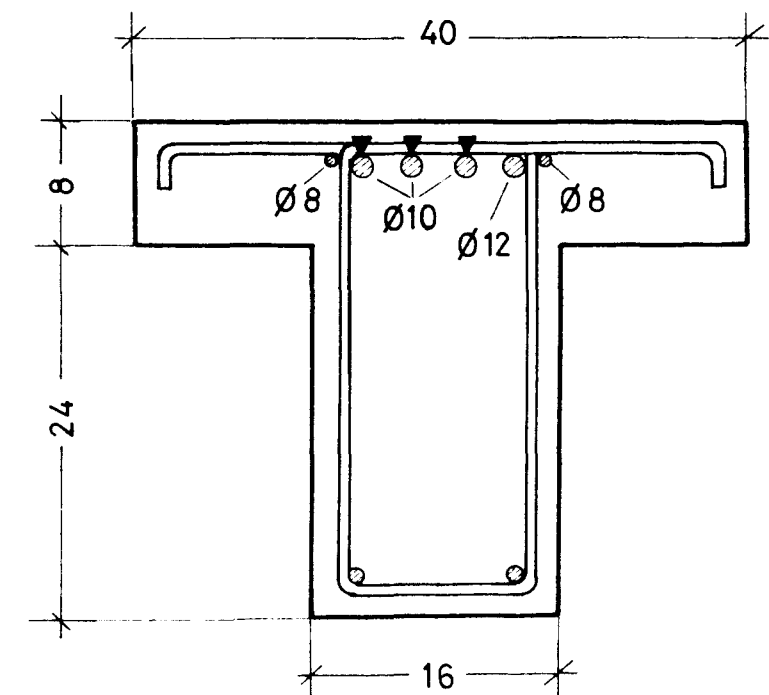
LAGE DER MESSQUERSCHNITTE



QUERSCHNITT I

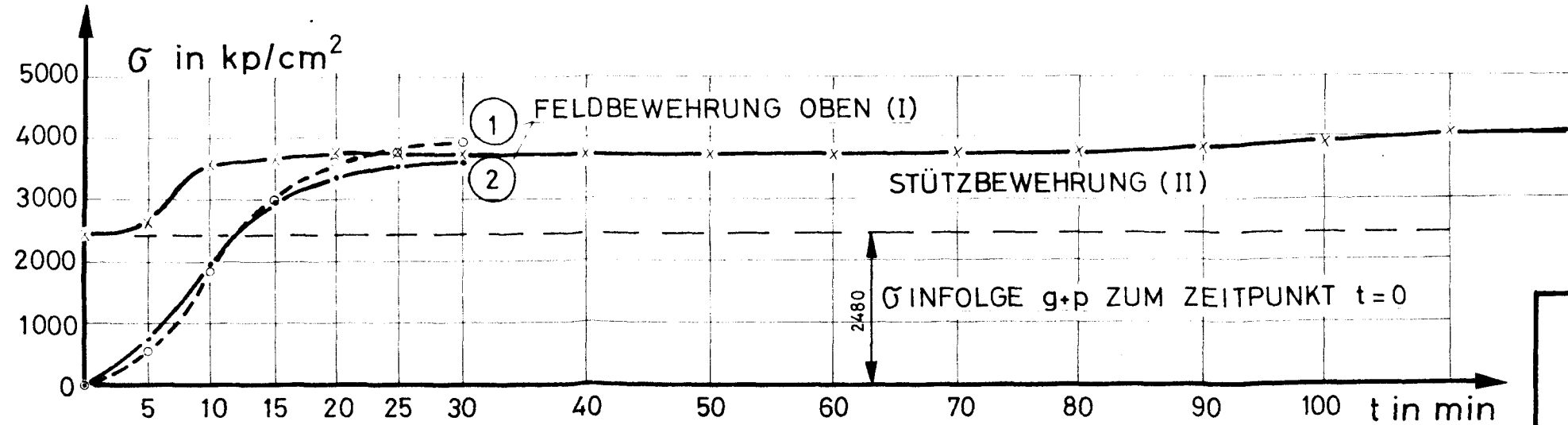
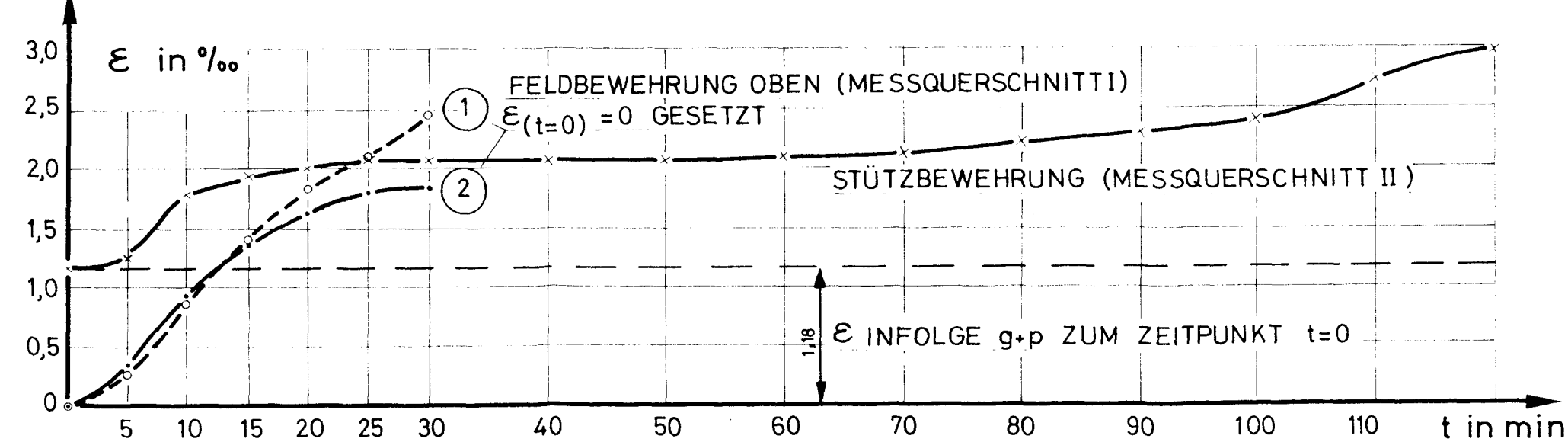
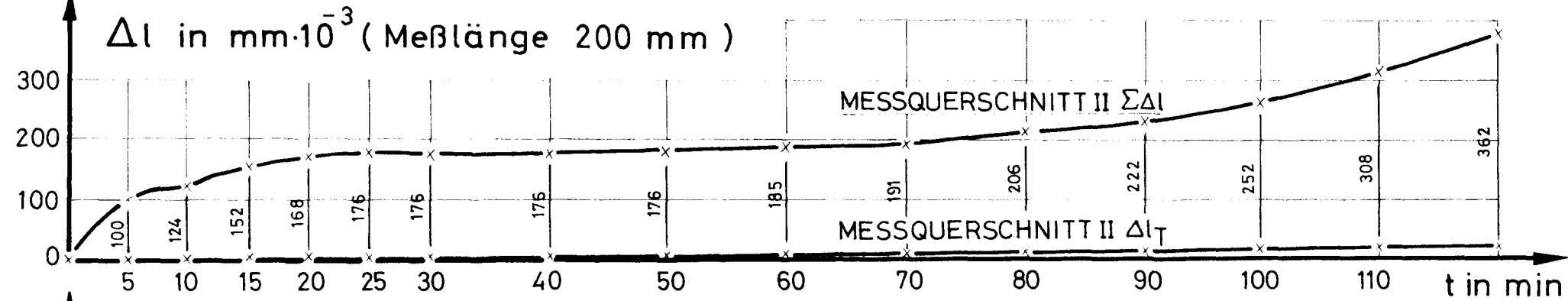
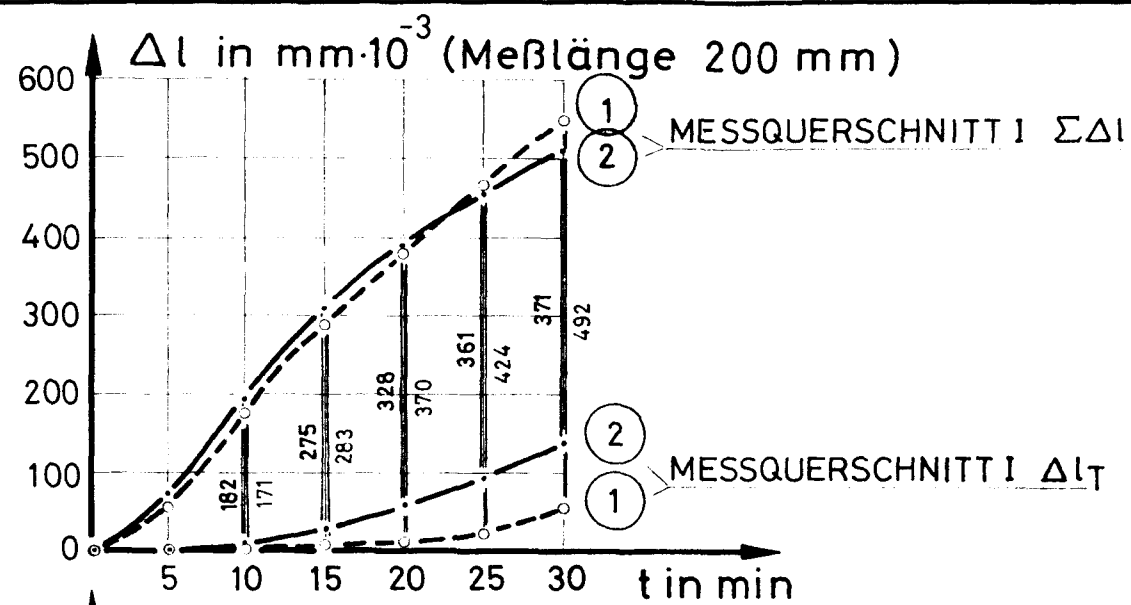


QUERSCHNITT II

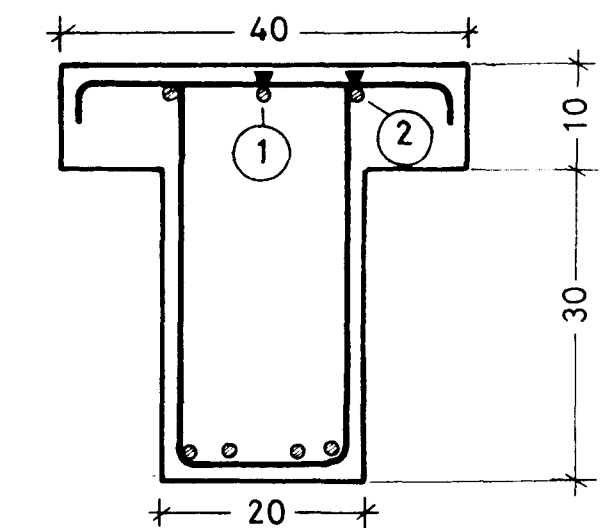
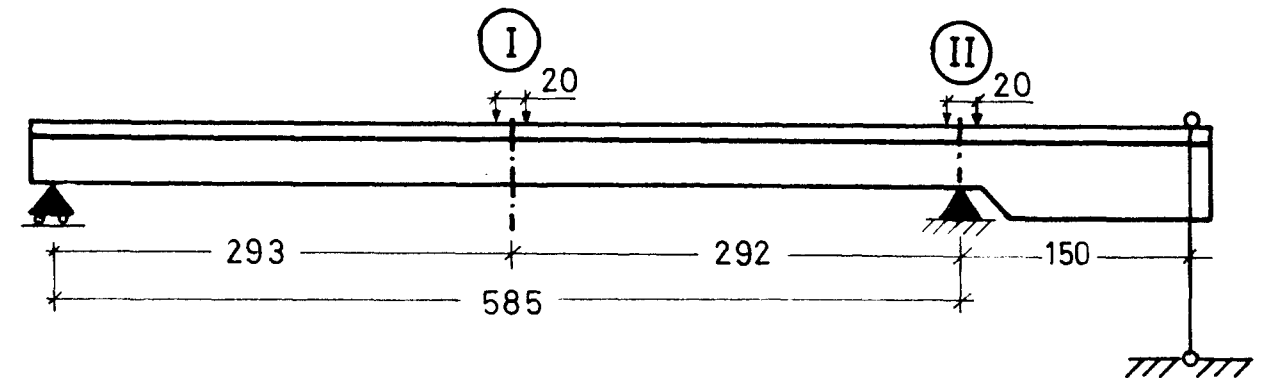


Anlage 5.2

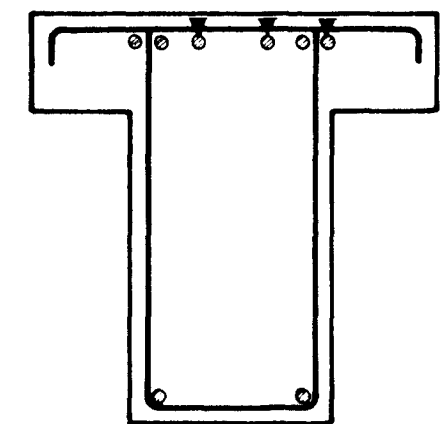
Durchlaufträger unter Feuerangriff
Balken 2 $b/d = 16/32$ (cm)
Dehnungsmeßergebnisse



LAGE DER MESSQUERSCHNITTE



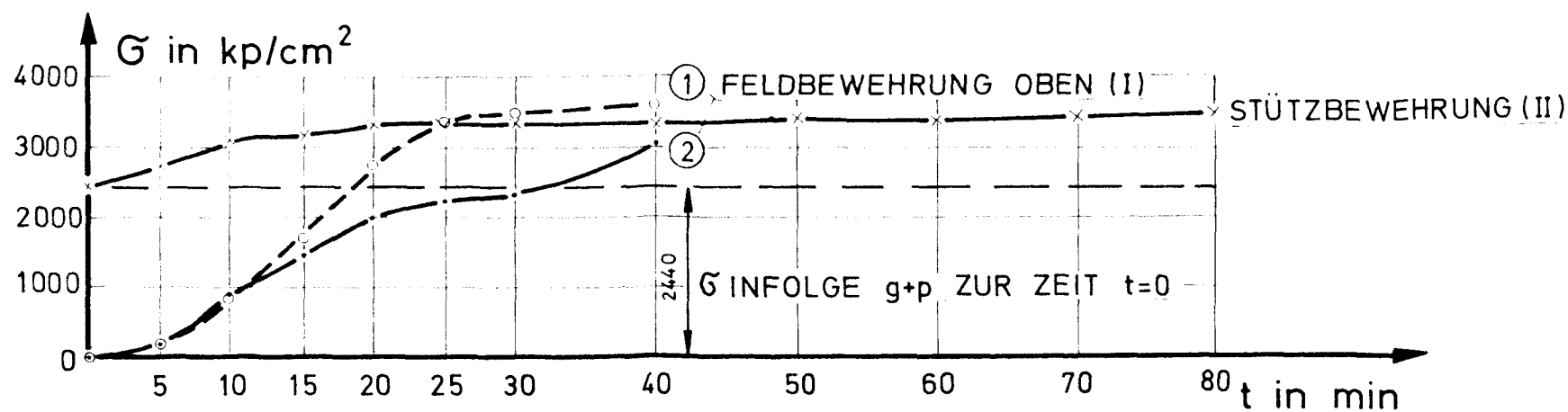
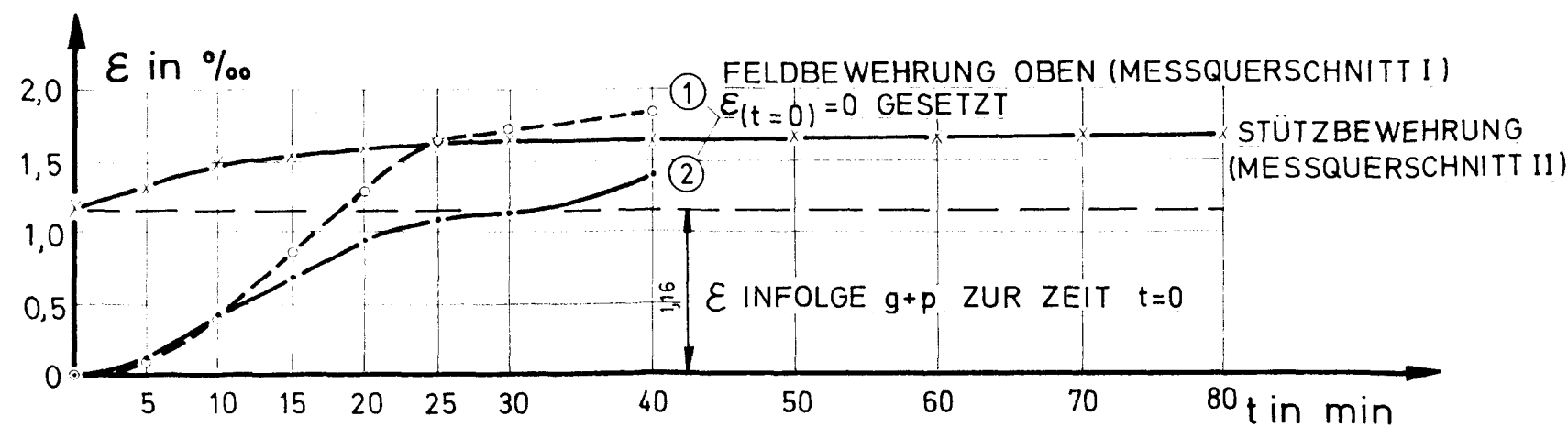
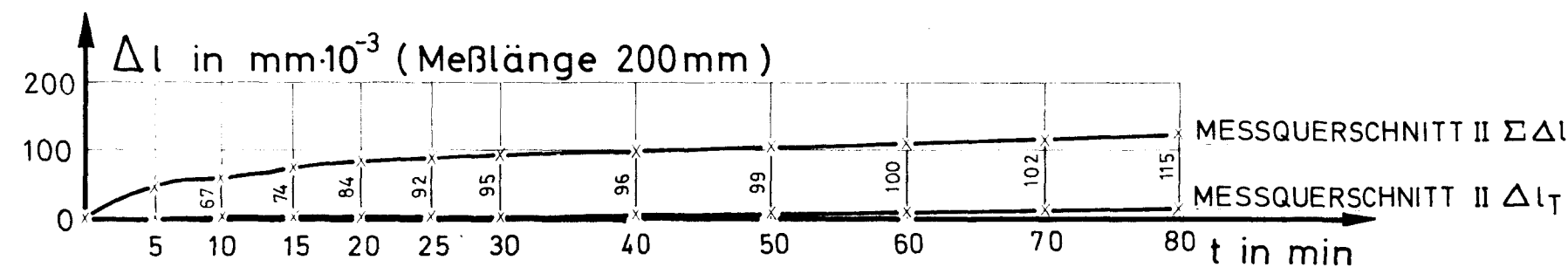
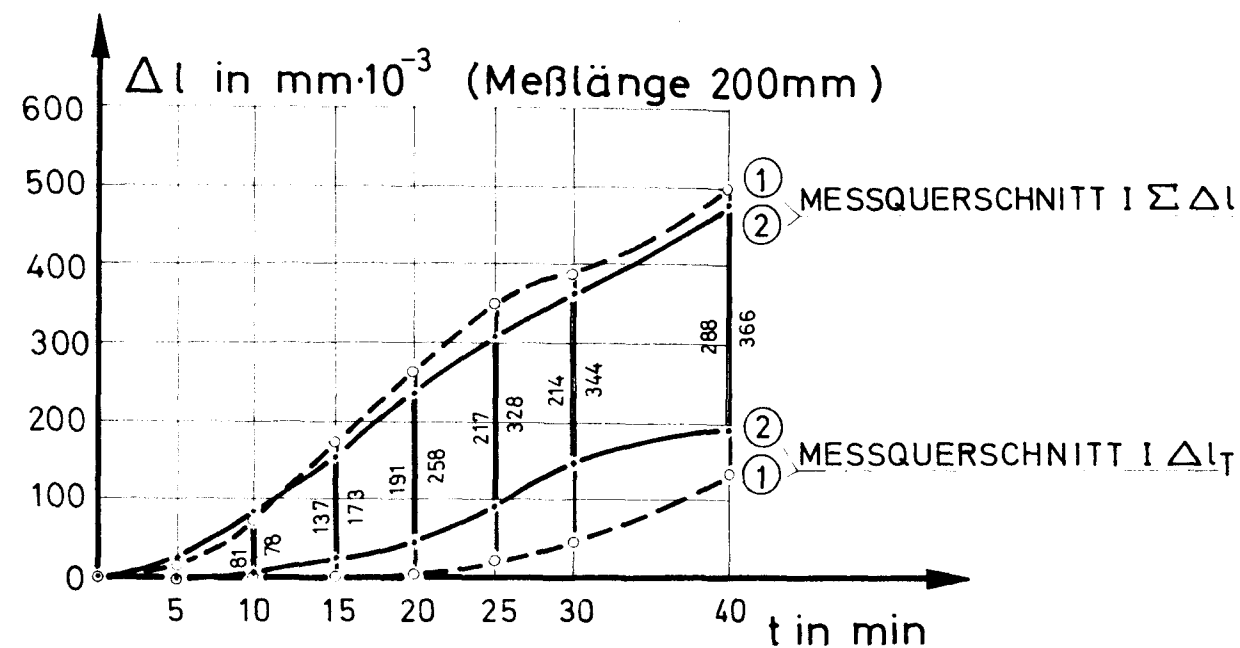
MESSQUERSCHNITT I



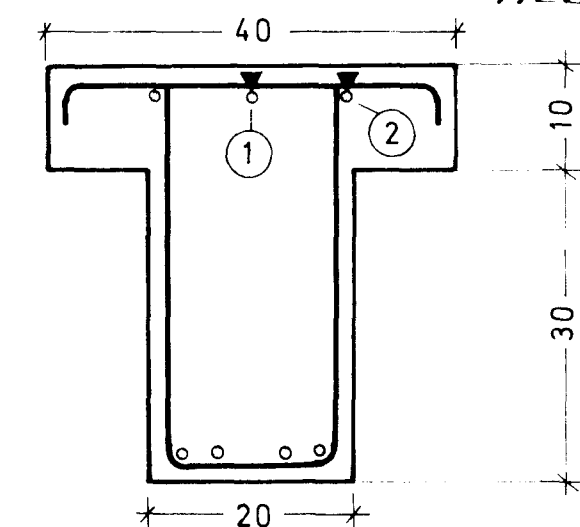
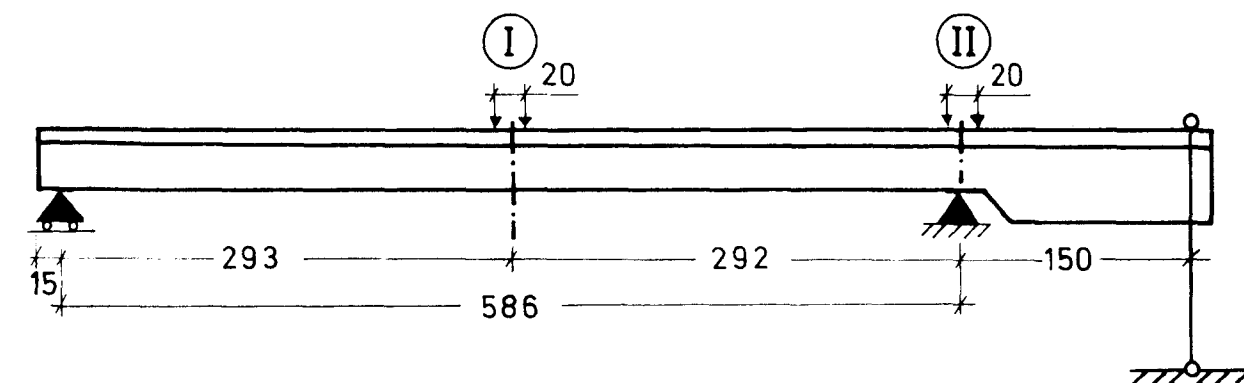
MESSQUERSCHNITT II

Anlage 5.3

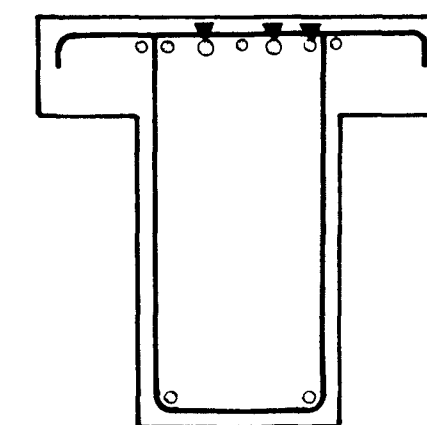
Durchlaufträger unter Feuerangriff
Balken 3 $b/d = 20/40$ (cm)
Dehnungsmeßergebnisse



LAGE DER MESSQUERSCHNITTE



MESSQUERSCHNITT I

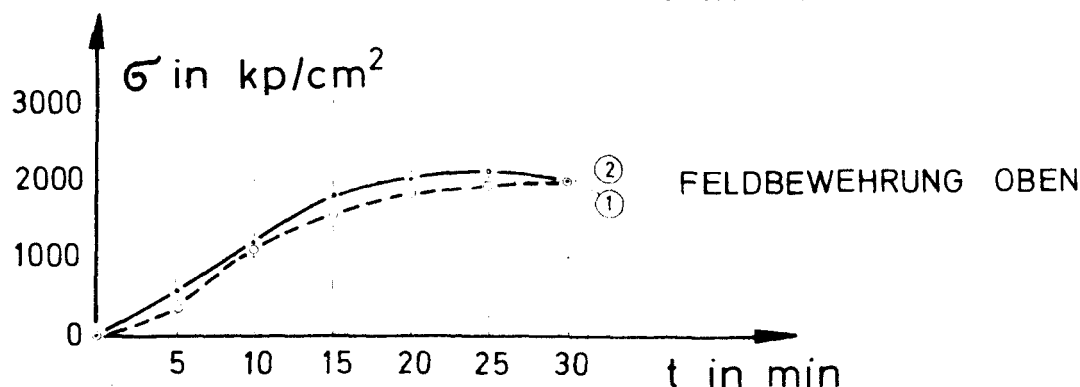
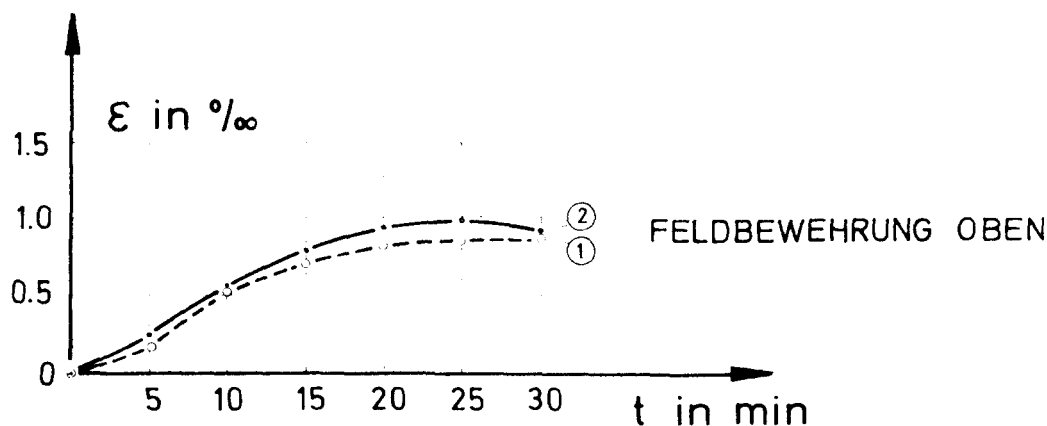
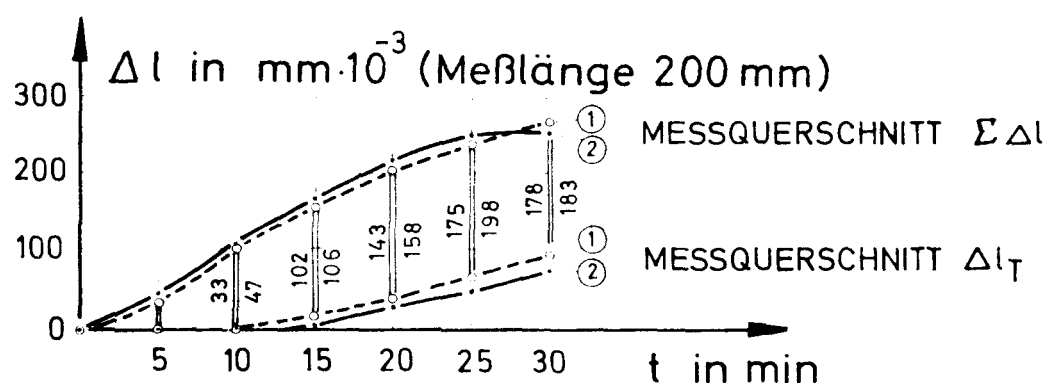
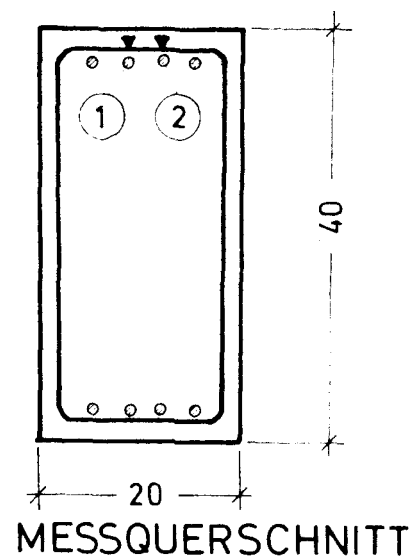
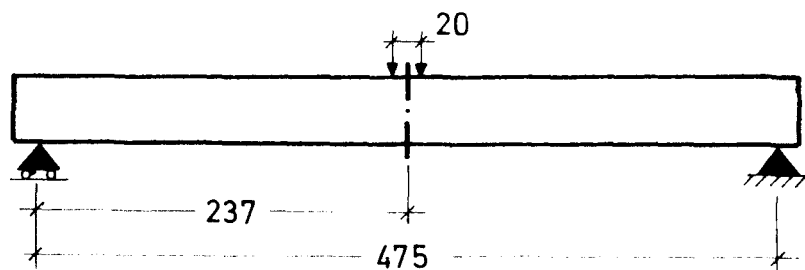


MESSQUERSCHNITT II

Anlage 5.4

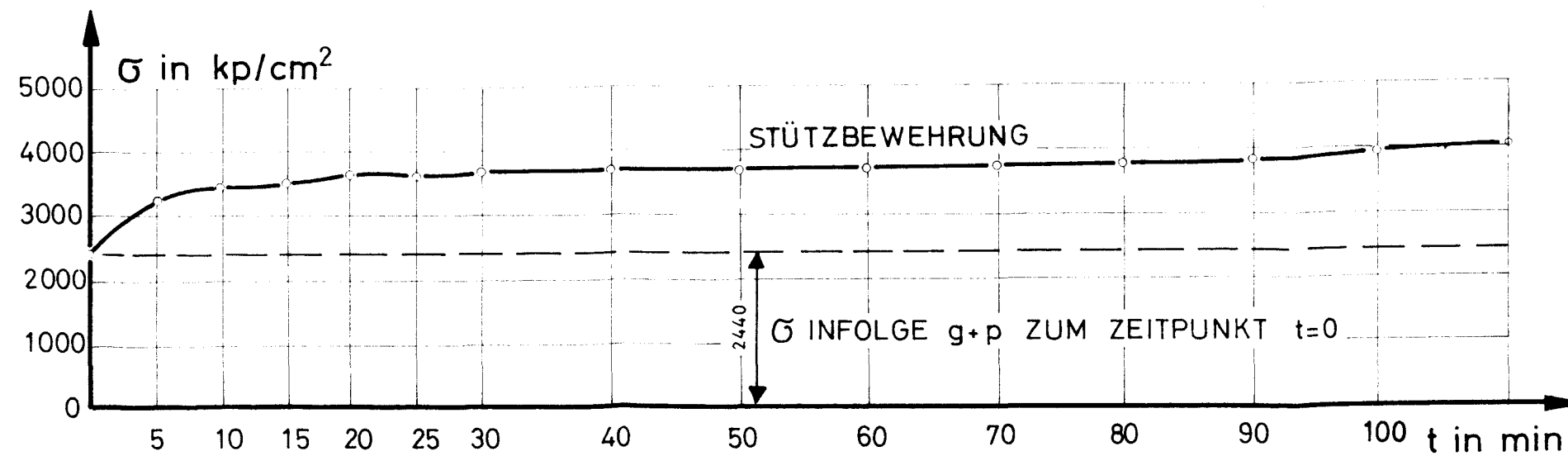
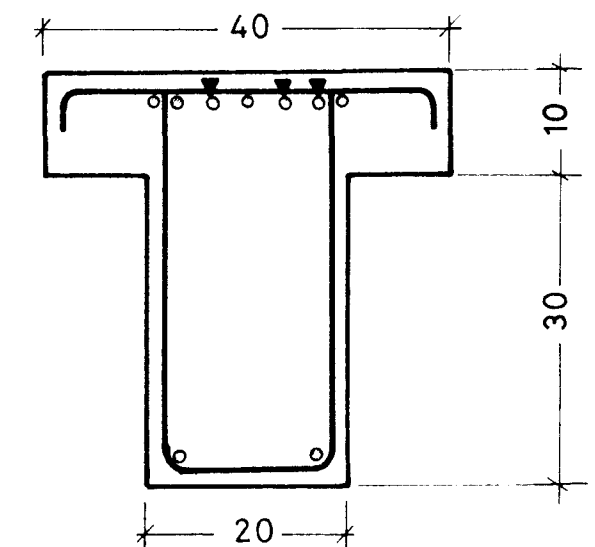
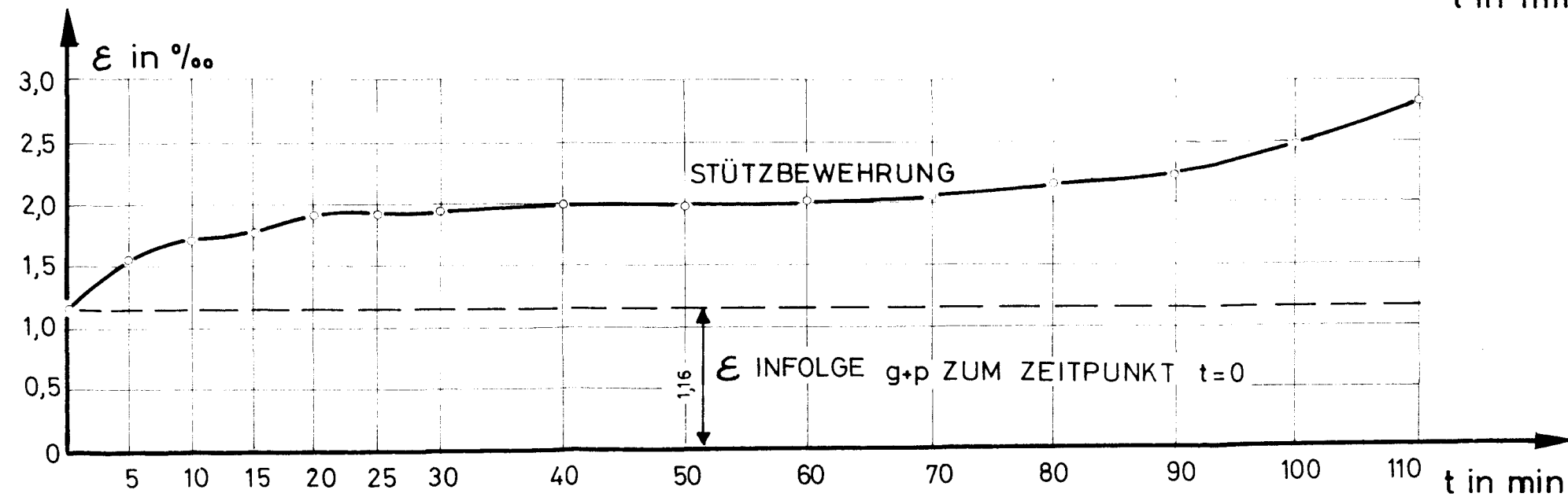
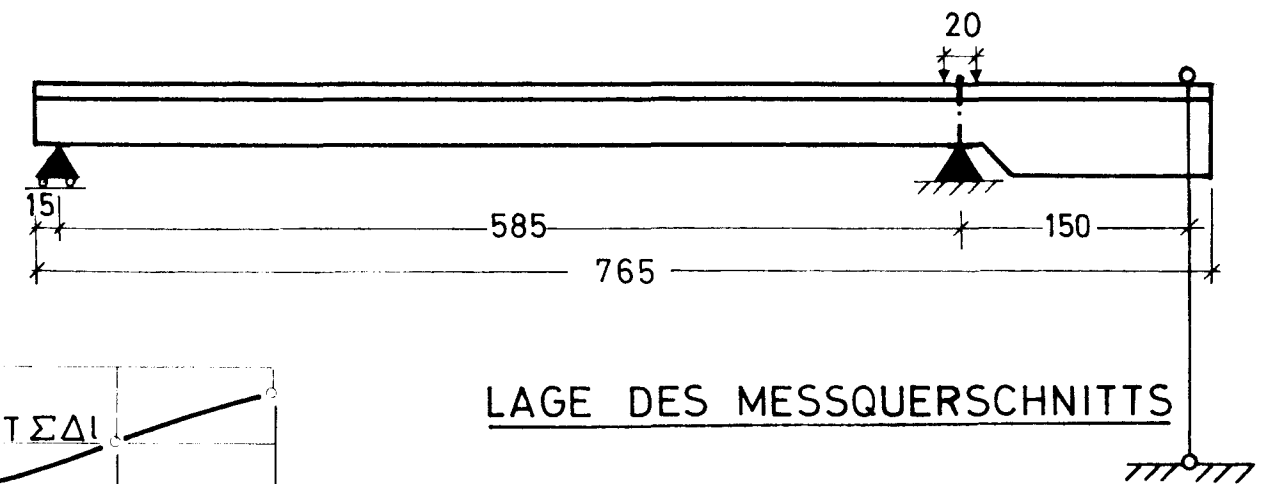
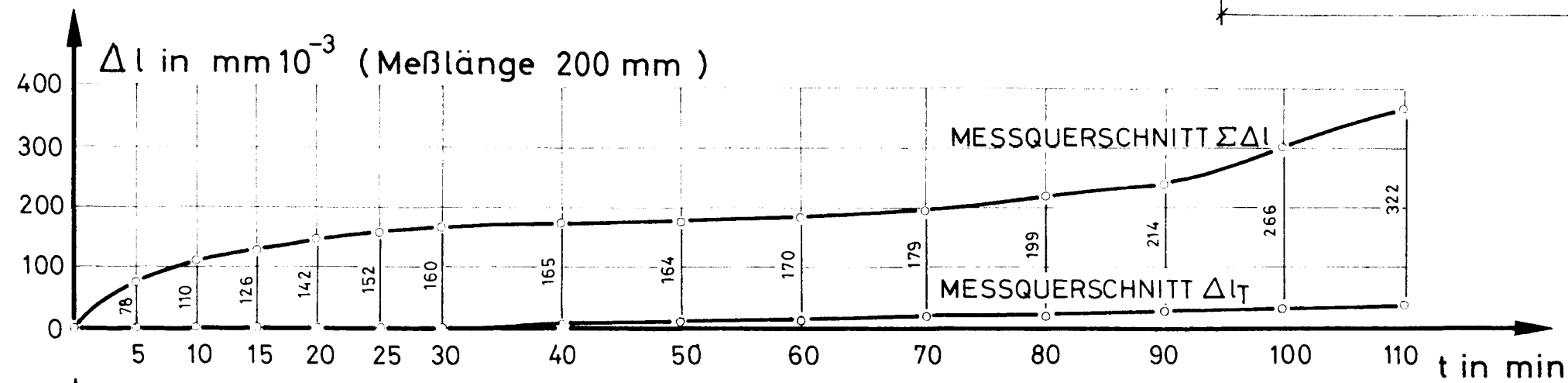
Durchlaufträger unter Feuerangriff
Balken 4 $b/d=20/40$ (cm)
Dehnungsmeßergebnisse

LAGE DES MESSQUERSCHNITTS



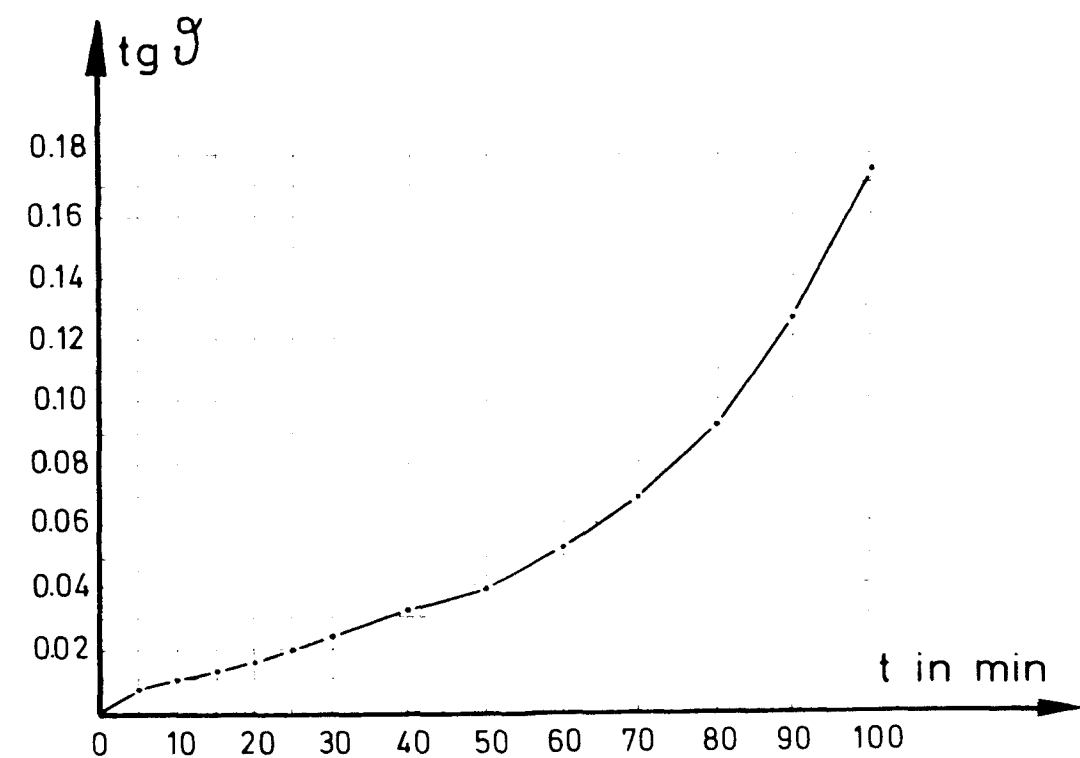
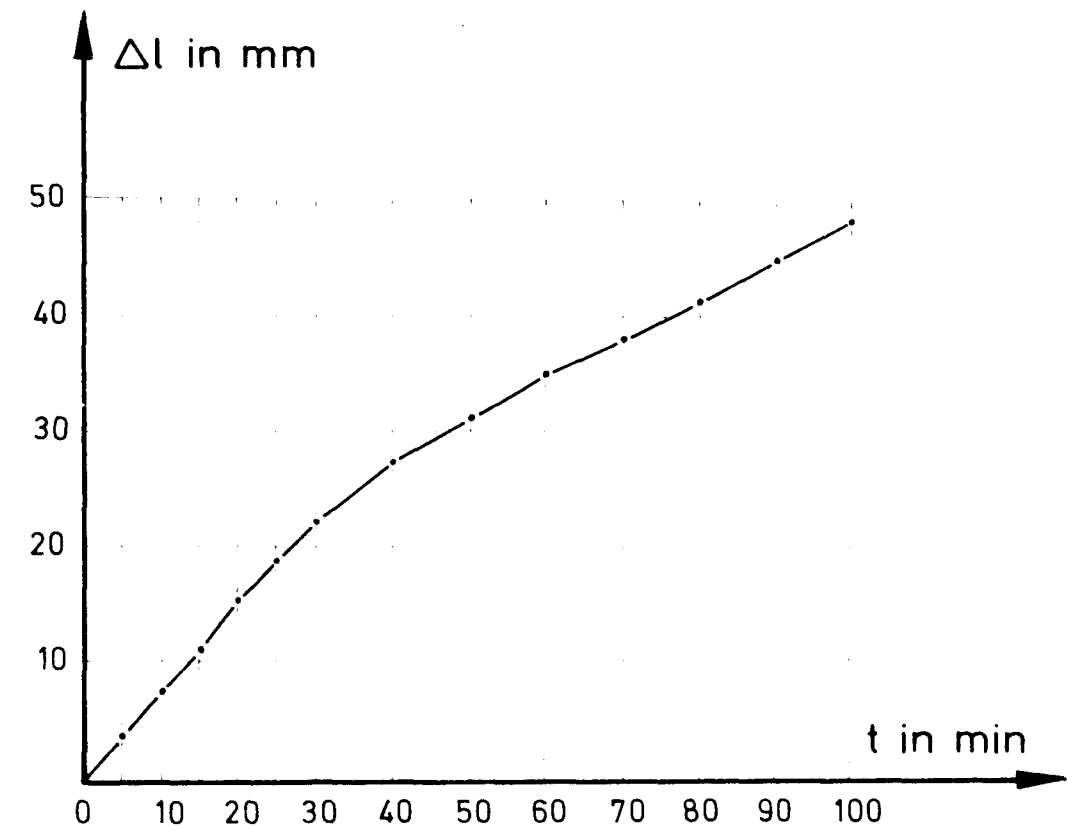
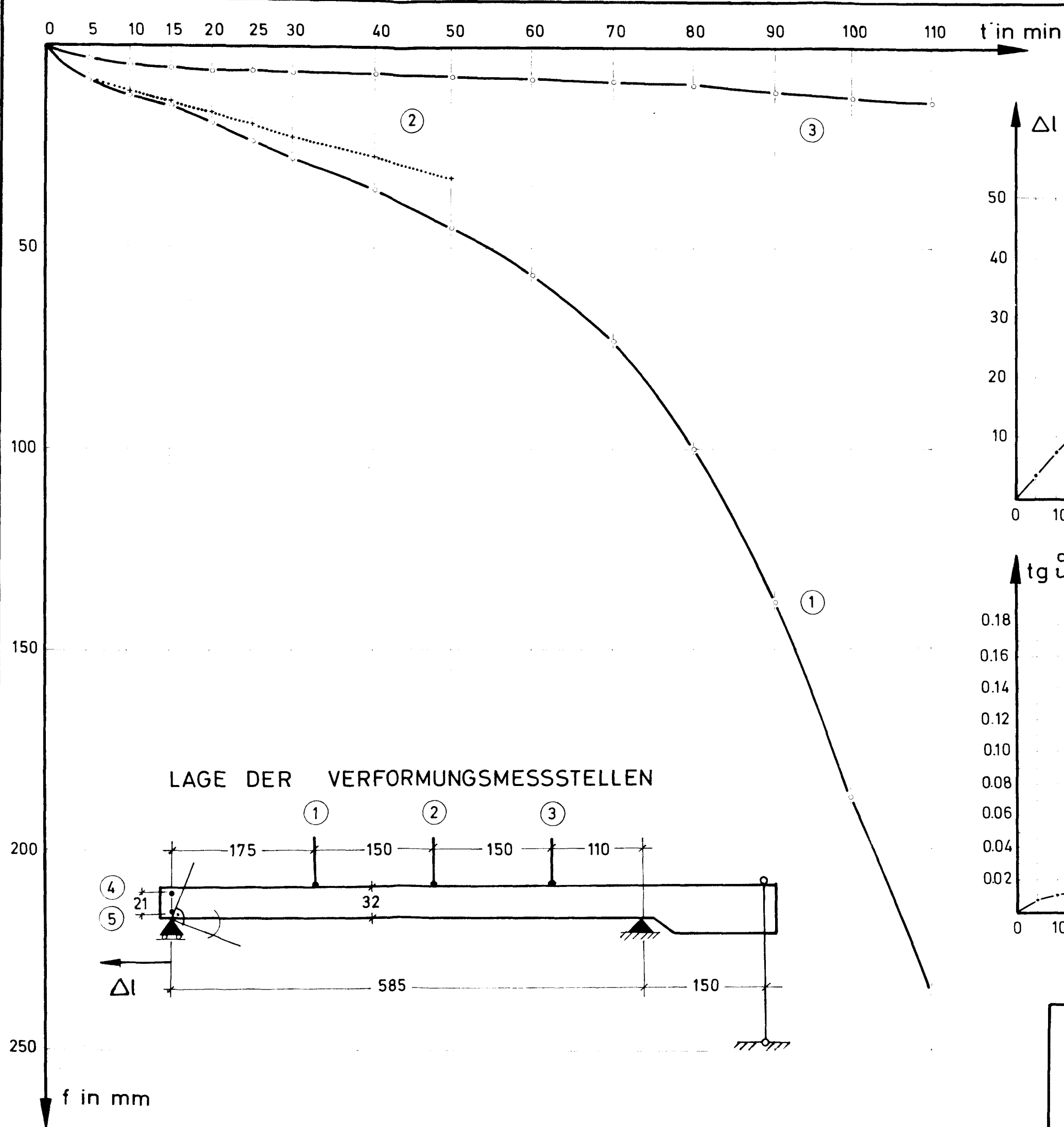
Anlage 5.5

Durchlaufbalken unter Feuerangriff
 Balken 6 $b/d = 20/40$ (cm)
 (statisch bestimmt)
 Dehnungsmeßergebnisse



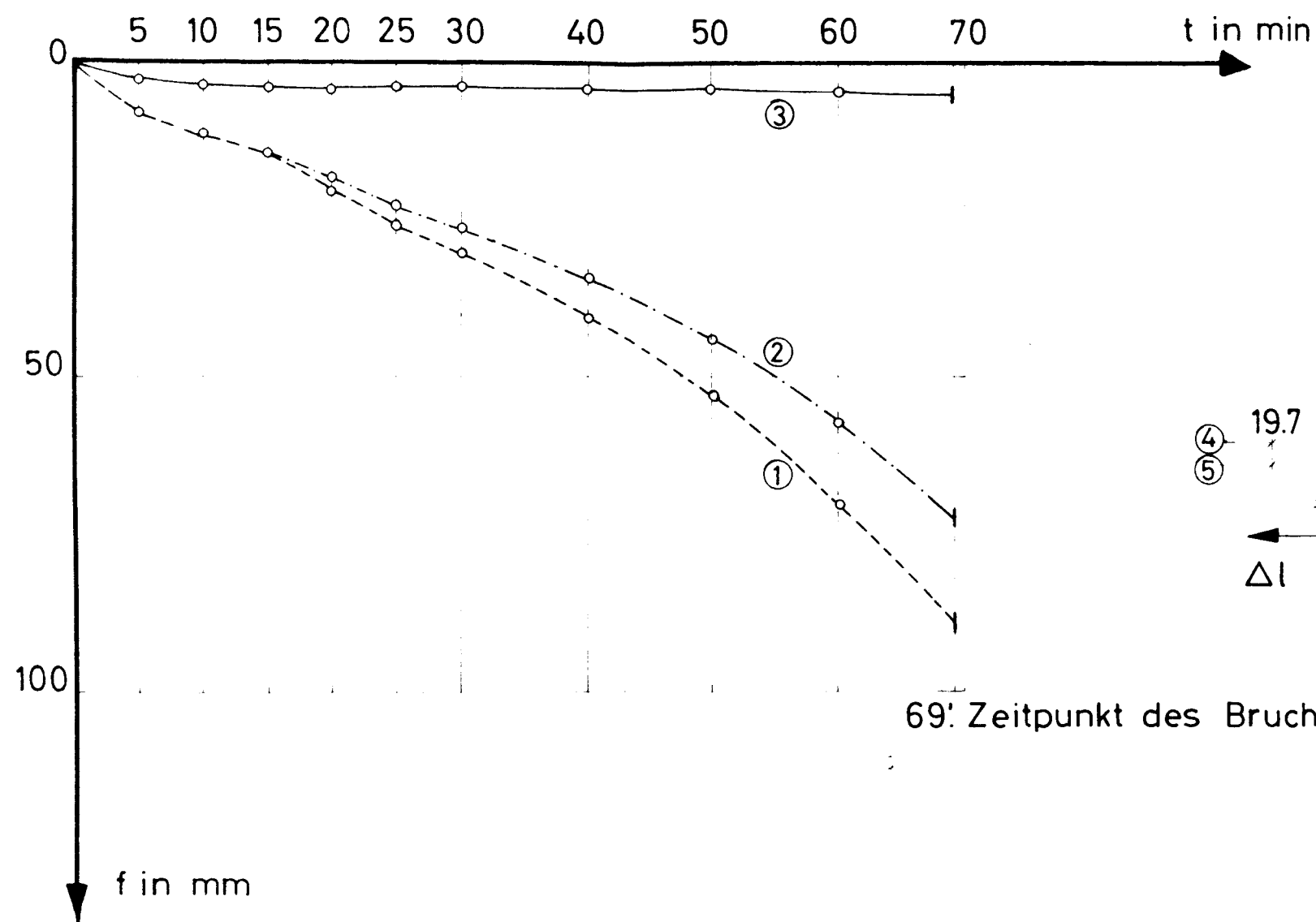
Anlage 5.6

Durchlaufträger unter Feuerangriff
Balken 7 $b/d = 20/40$ (cm)
Dehnungsmeßergebnisse

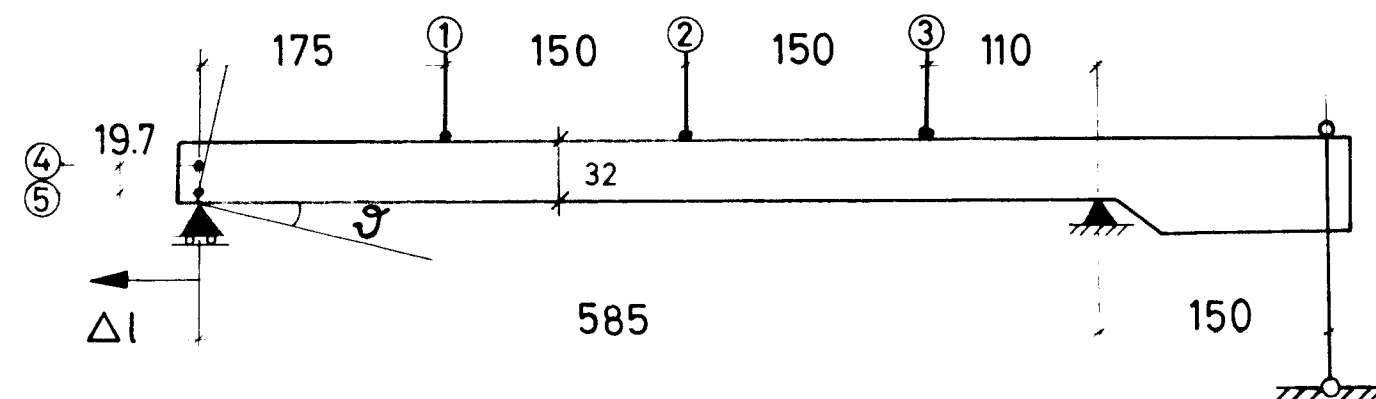


Anlage 6.1

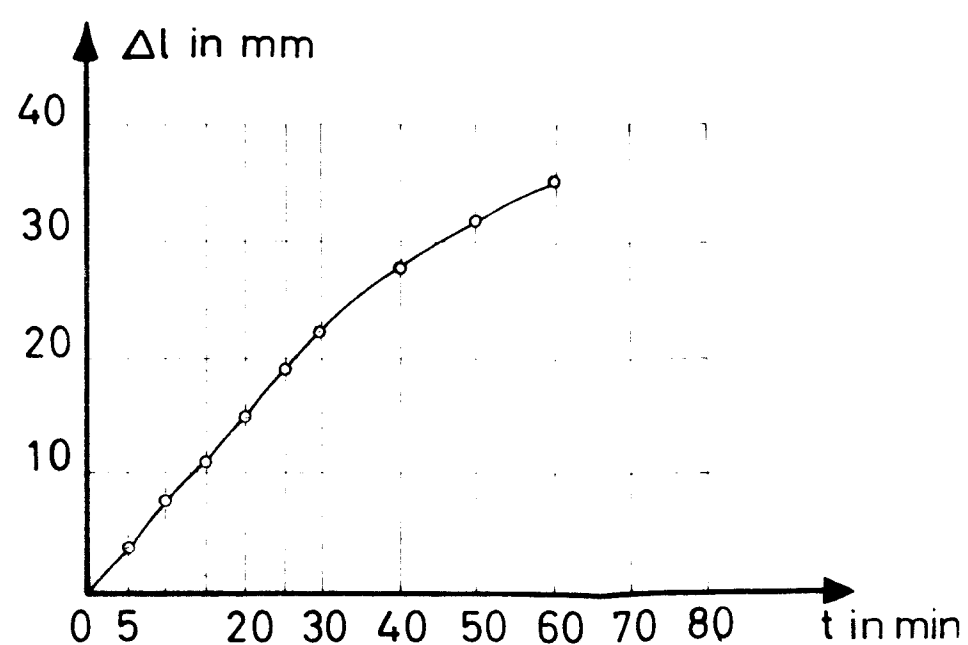
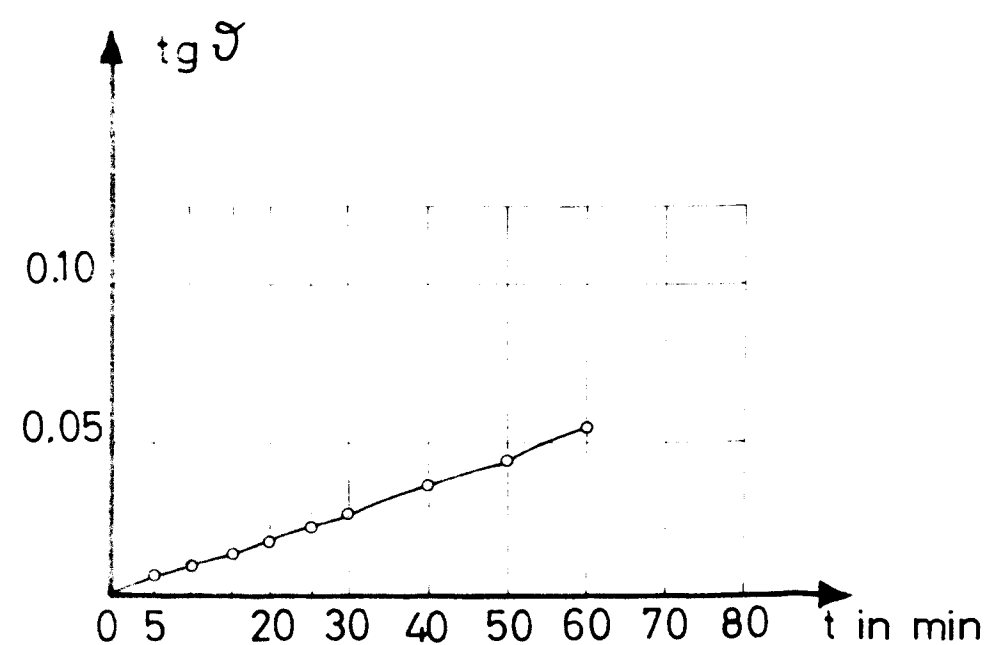
Durchlaufträger unter Feuerangriff
 Balken 1 $b/d=16/32$ (cm)
 Verformungsmeßergebnisse



LAGE DER VERFORMUNGSMESSSTELLEN

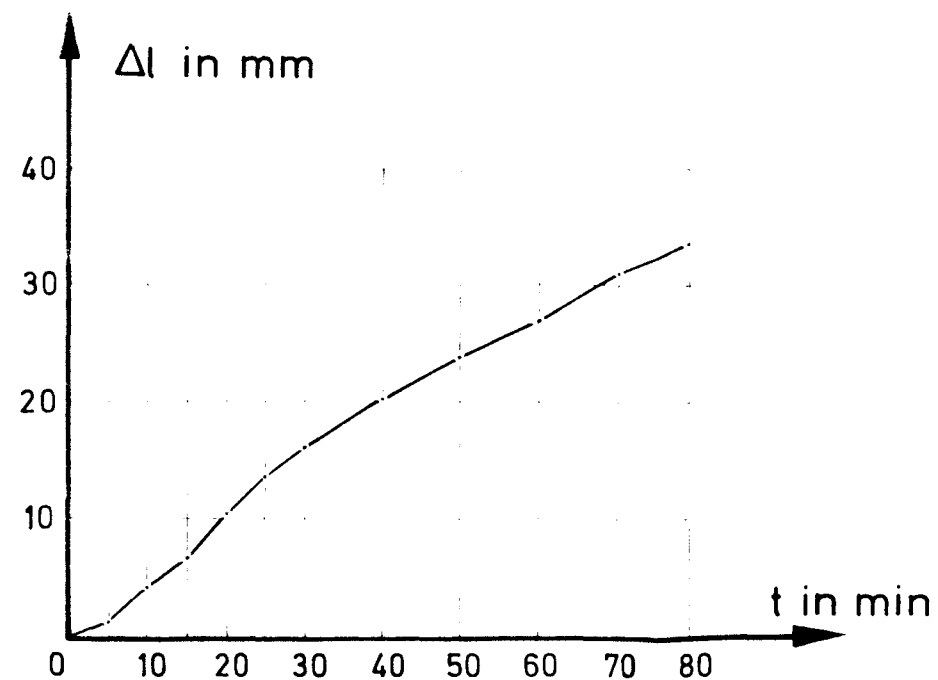
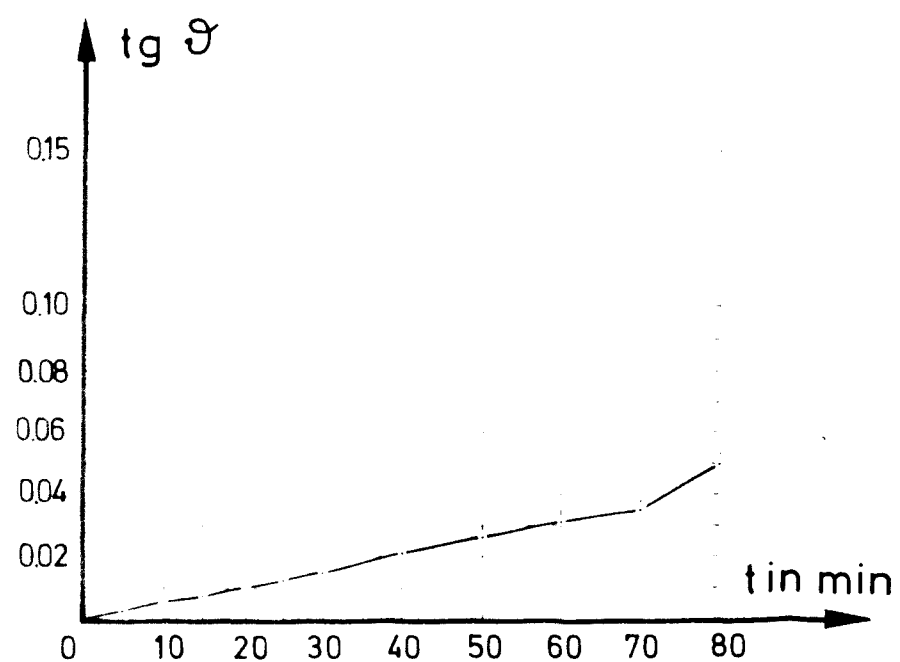
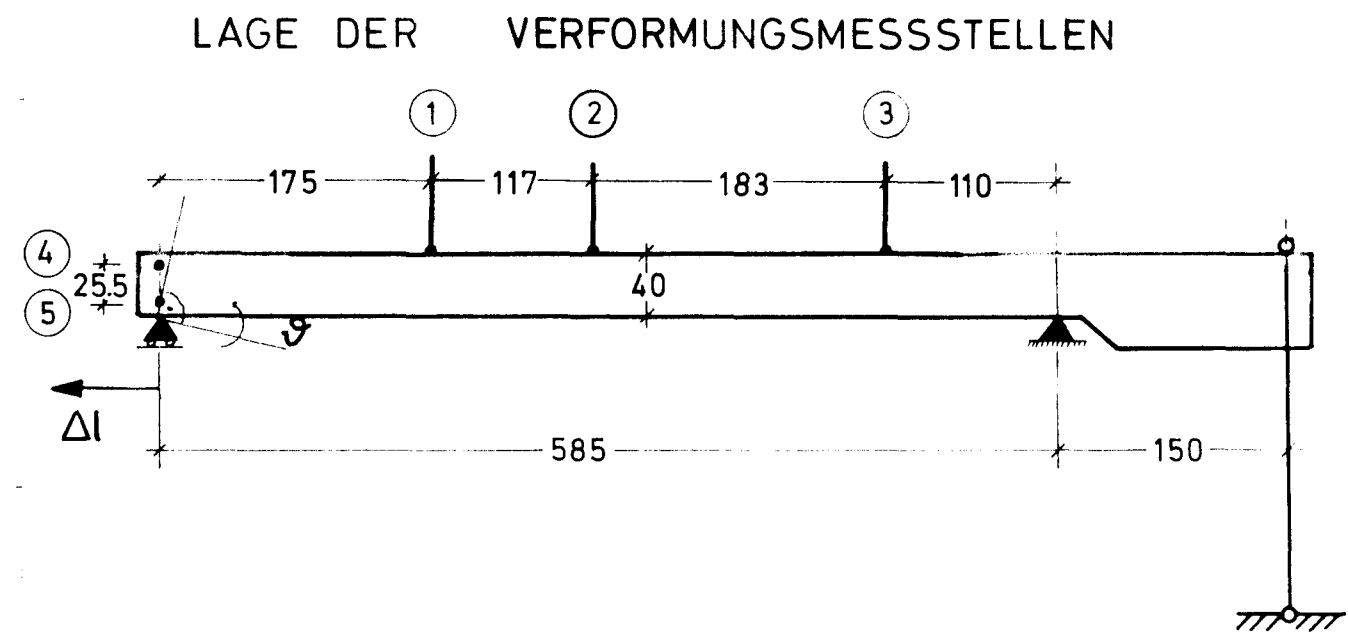
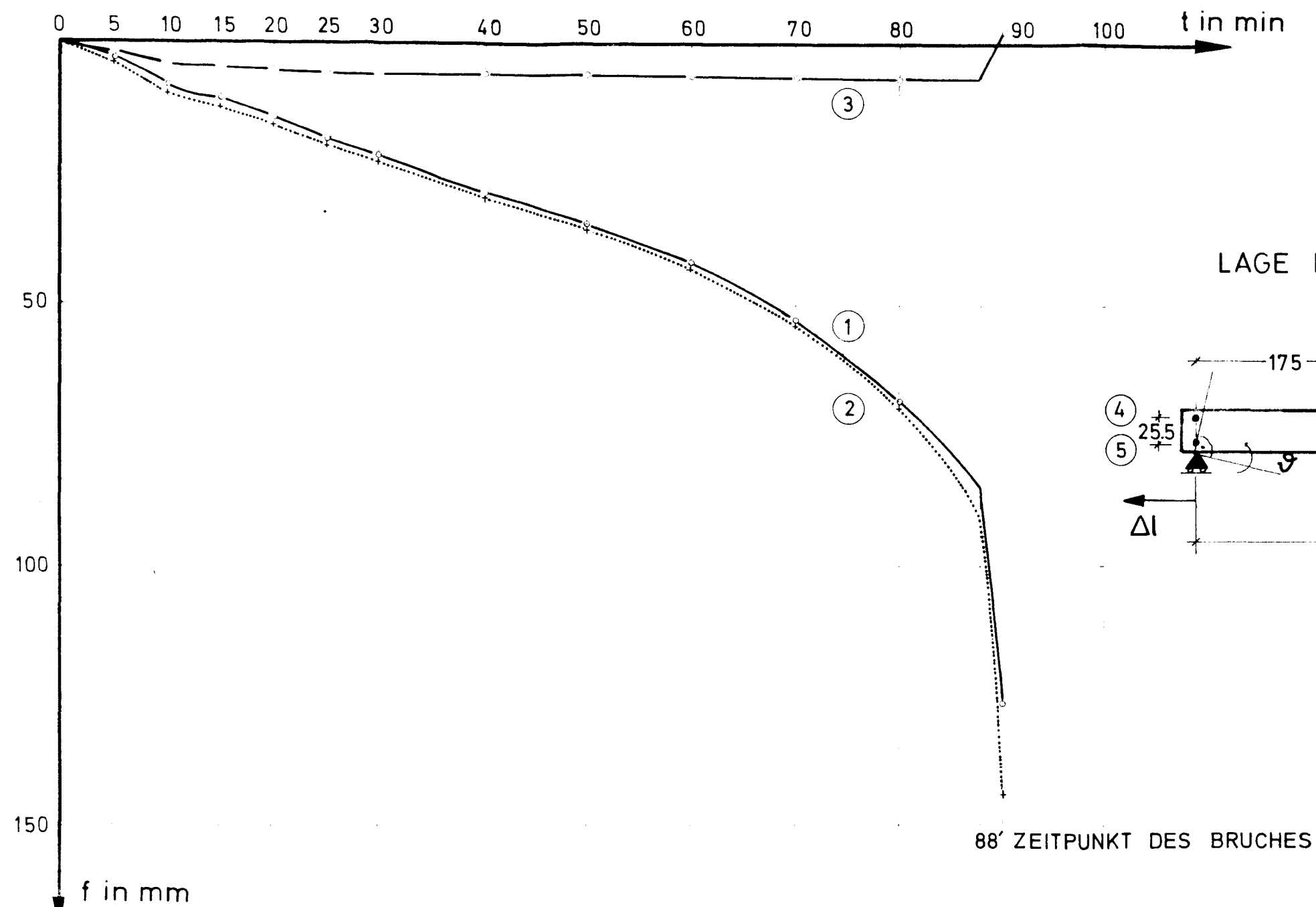


69. Zeitpunkt des Bruches



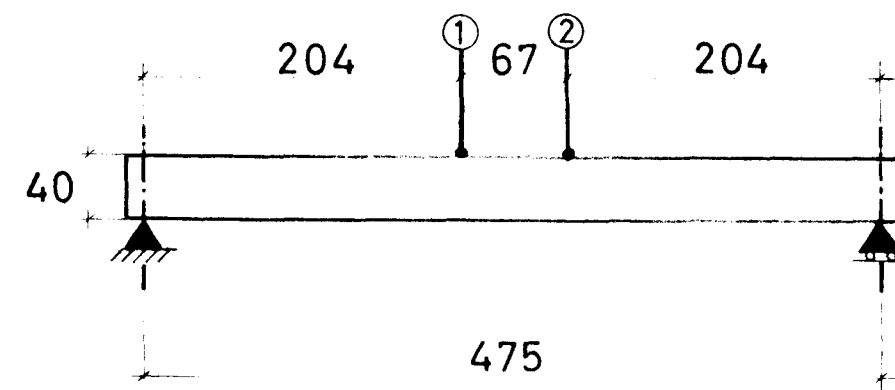
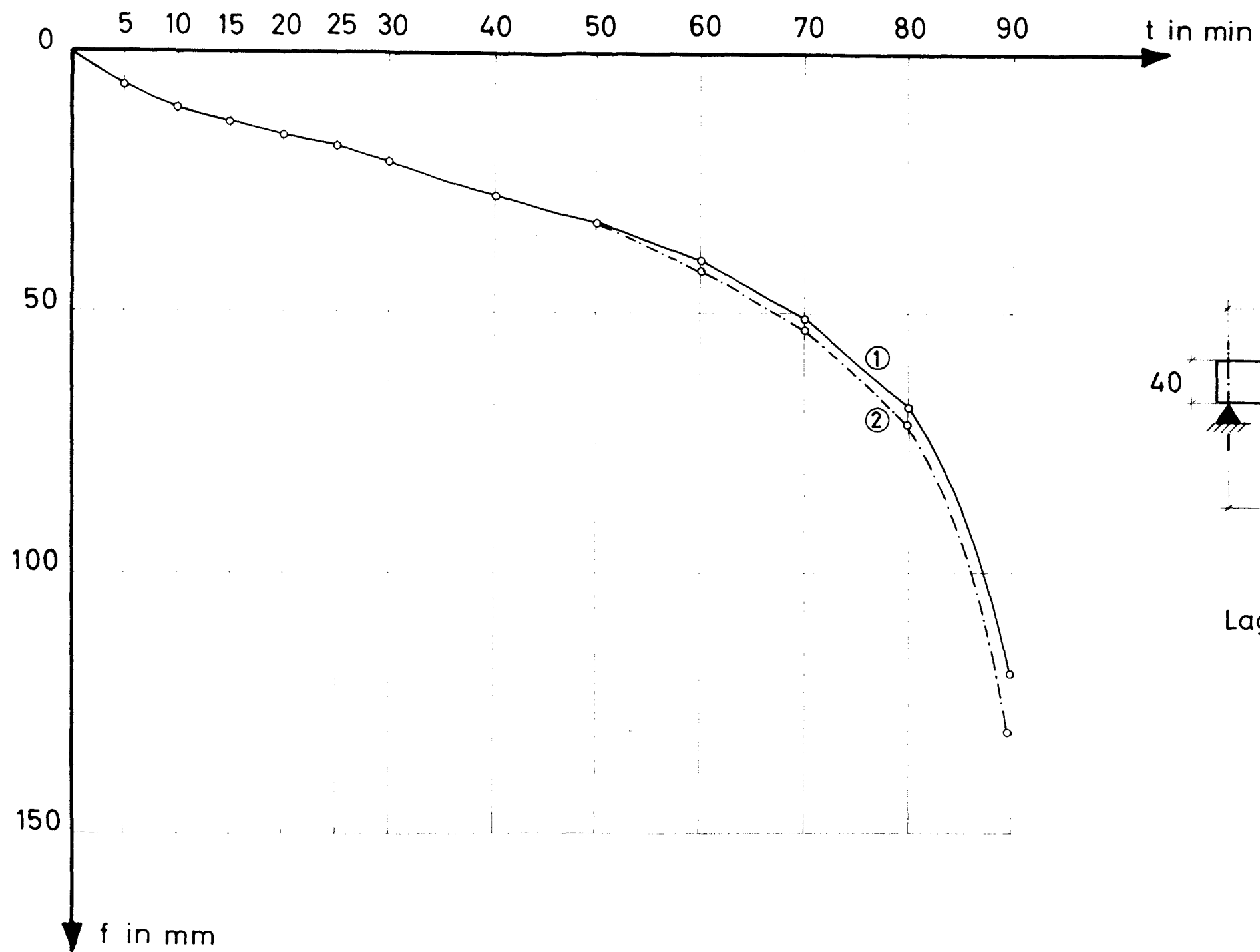
Anlage 6.2

Durchlaufträger unter Feuerangriff
Balken 2 $b/d = 16/32$ (cm)
Verformungsmeßergebnisse



Anlage 6.4

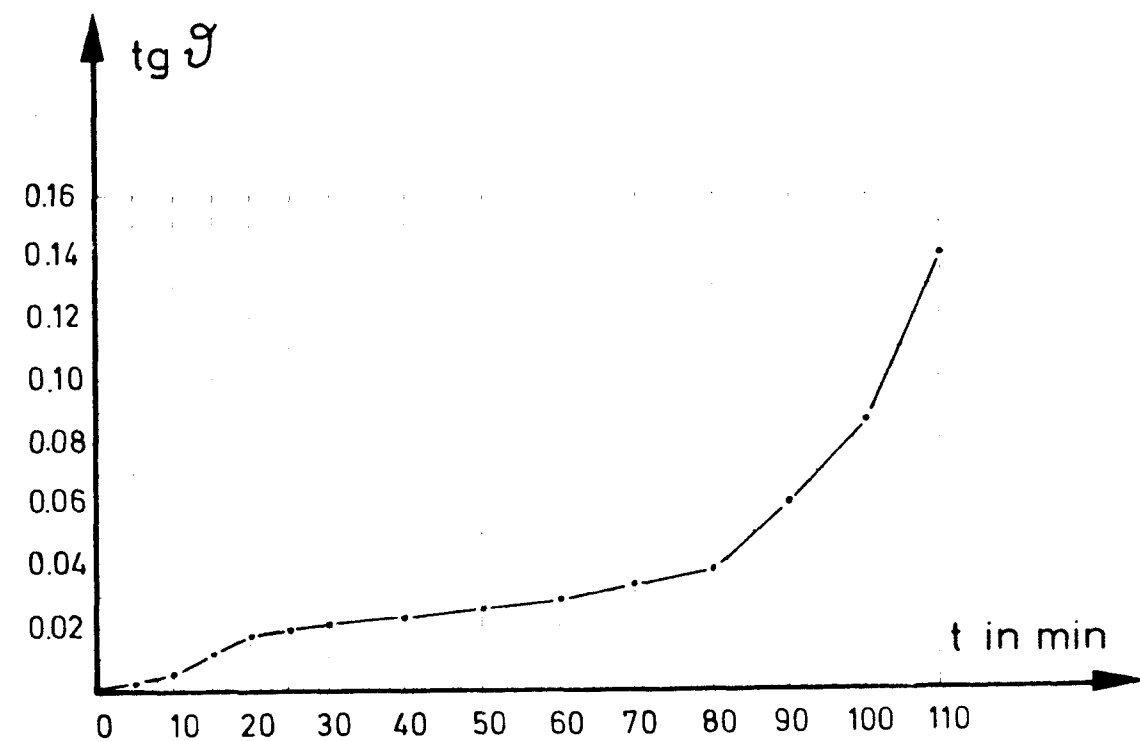
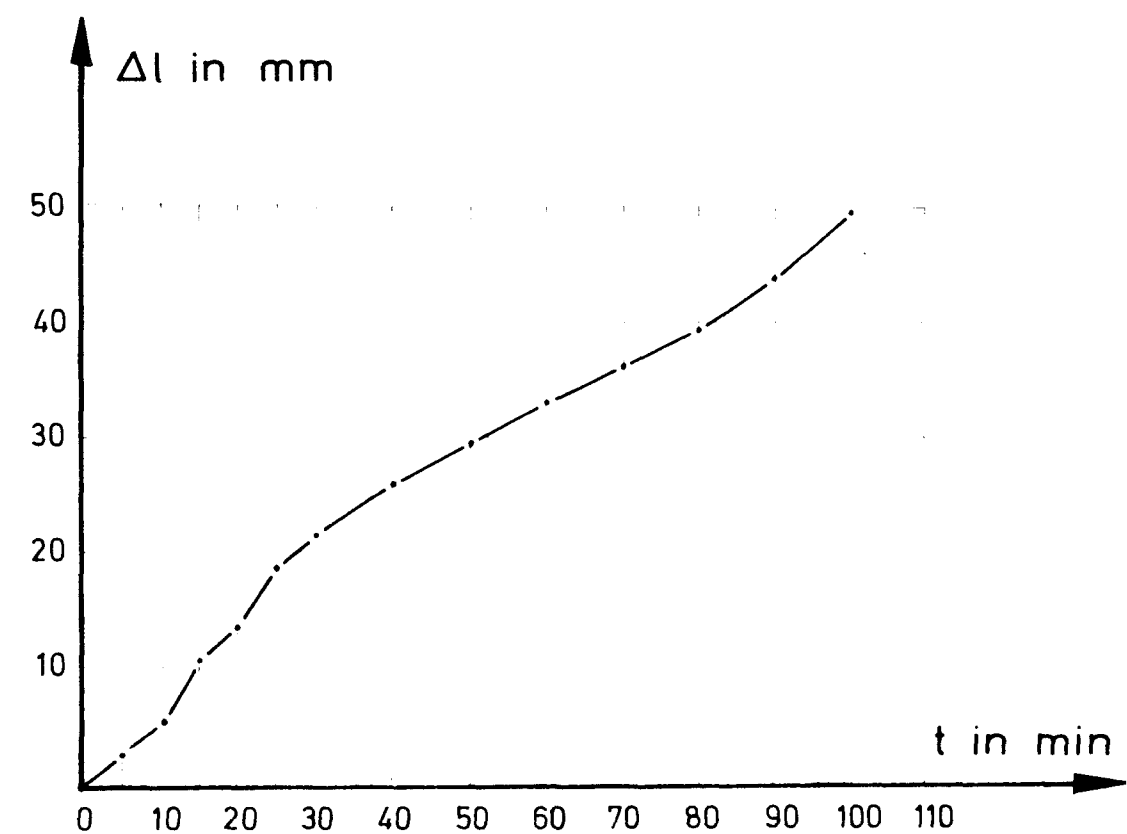
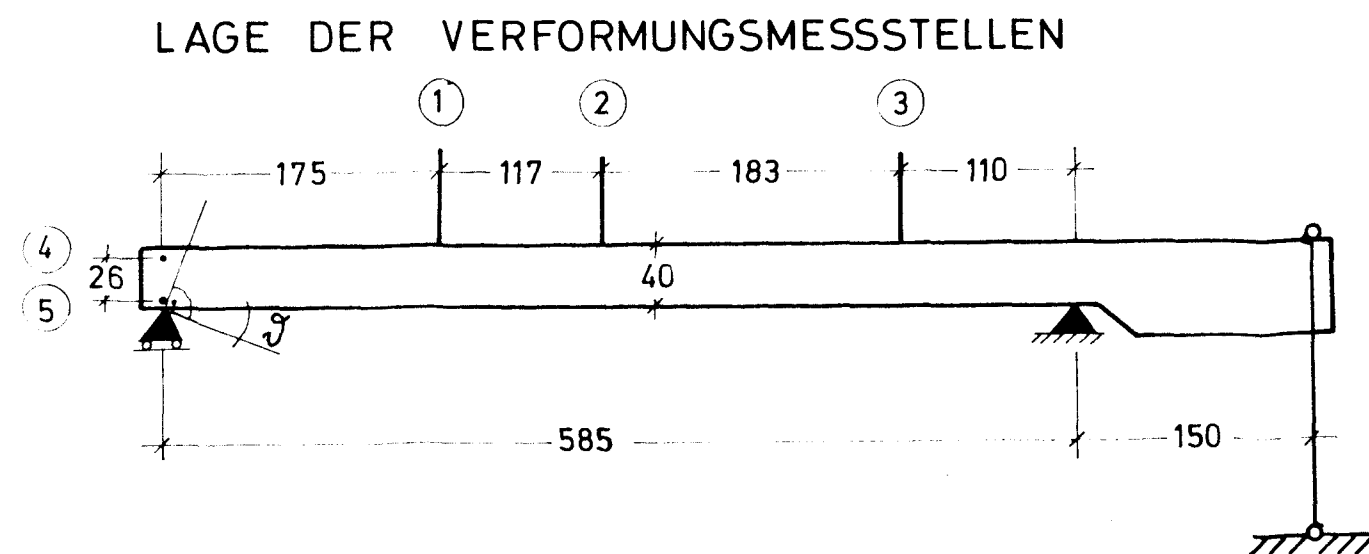
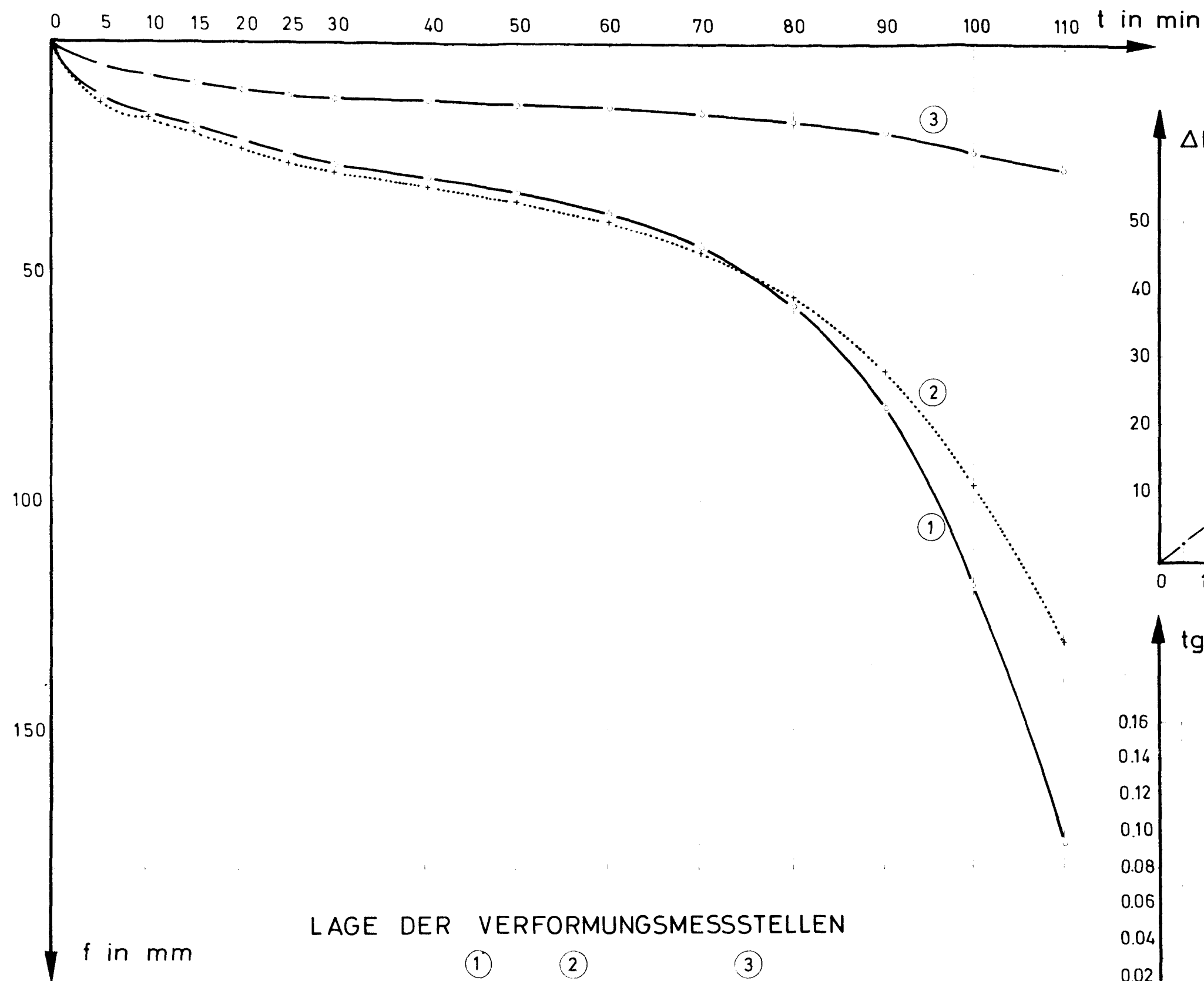
Durchlaufträger unter Feuerangriff
Balken 4 $b/d = 20/40$ cm
Verformungsmeßergebnisse



Lage der Durchbiegungsmeßstellen

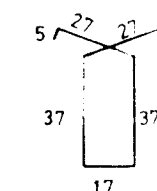
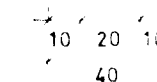
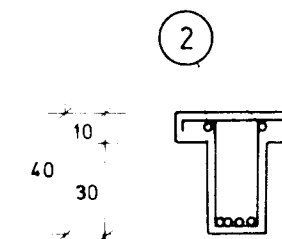
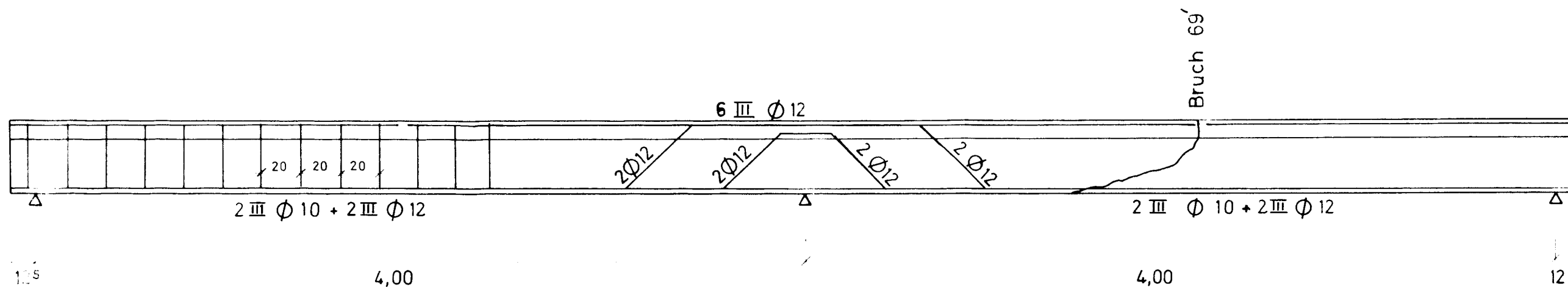
Anlage 6.5

Durchlaufträger unter Feuerangriff
 Balken 6 $b/d=20/40$ (Statisch best.)
 Verformungsmeßergebnisse

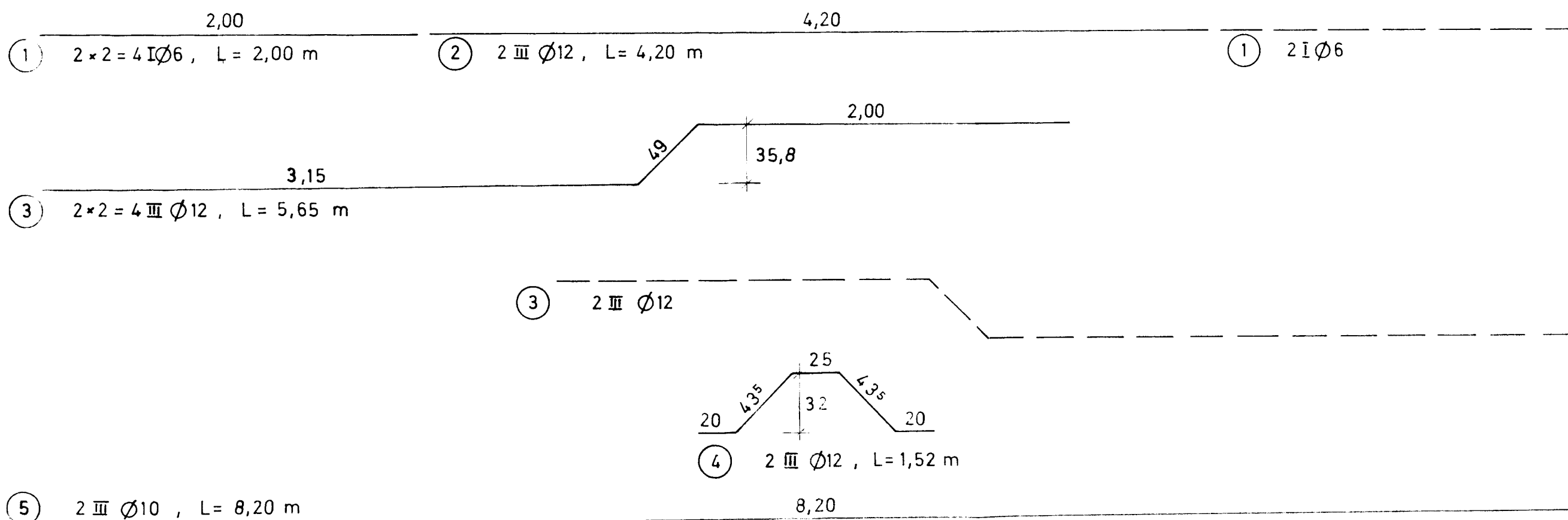


Anlage 6.6

Durchlaufträger unter Feuerangriff
Balken 7 b/d=20/40 (cm)
Verformungsmeßergebnisse



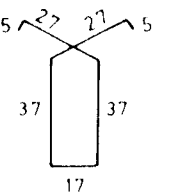
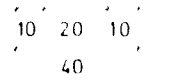
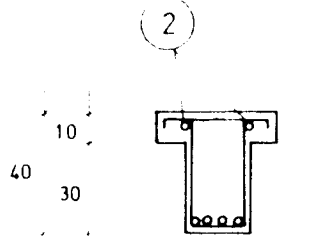
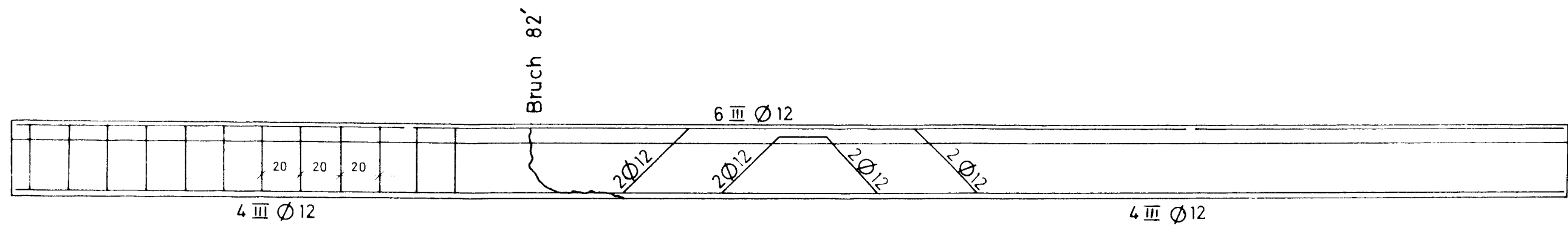
(6) 41 I Ø 6
e = 20 cm
L = 1,55 m



Stahlliste

Nr	Stück	Ø	L	L _{ges}		
				III Ø 12	III Ø 10	I Ø 6
1	4	I 5	2,00			8,00
2	2	III 12	4,20	8,40		
3	4	"	5,65	22,60		
4	2	"	1,52	3,04		
5	2	III 10	8,20		16,40	
6	1	I 6	1,55			63,55
L [m]				34,04	16,40	71,55
G [kg]				30	10	16

Schal - und Bewehrungsplan	Balken I
Durchlaufträger unter Feuerangriff	Anlage 7.1
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



5 4 I Ø 6
e = 20 cm
L = 1,55 m

1 2 x 2 = 4 I Ø 6 ; L = 2,00 m 2 2 III Ø 12 ; L = 4,20 m 1 2 I Ø 6

3 2 2 = 4 III Ø 12 ; L = 5,65 m

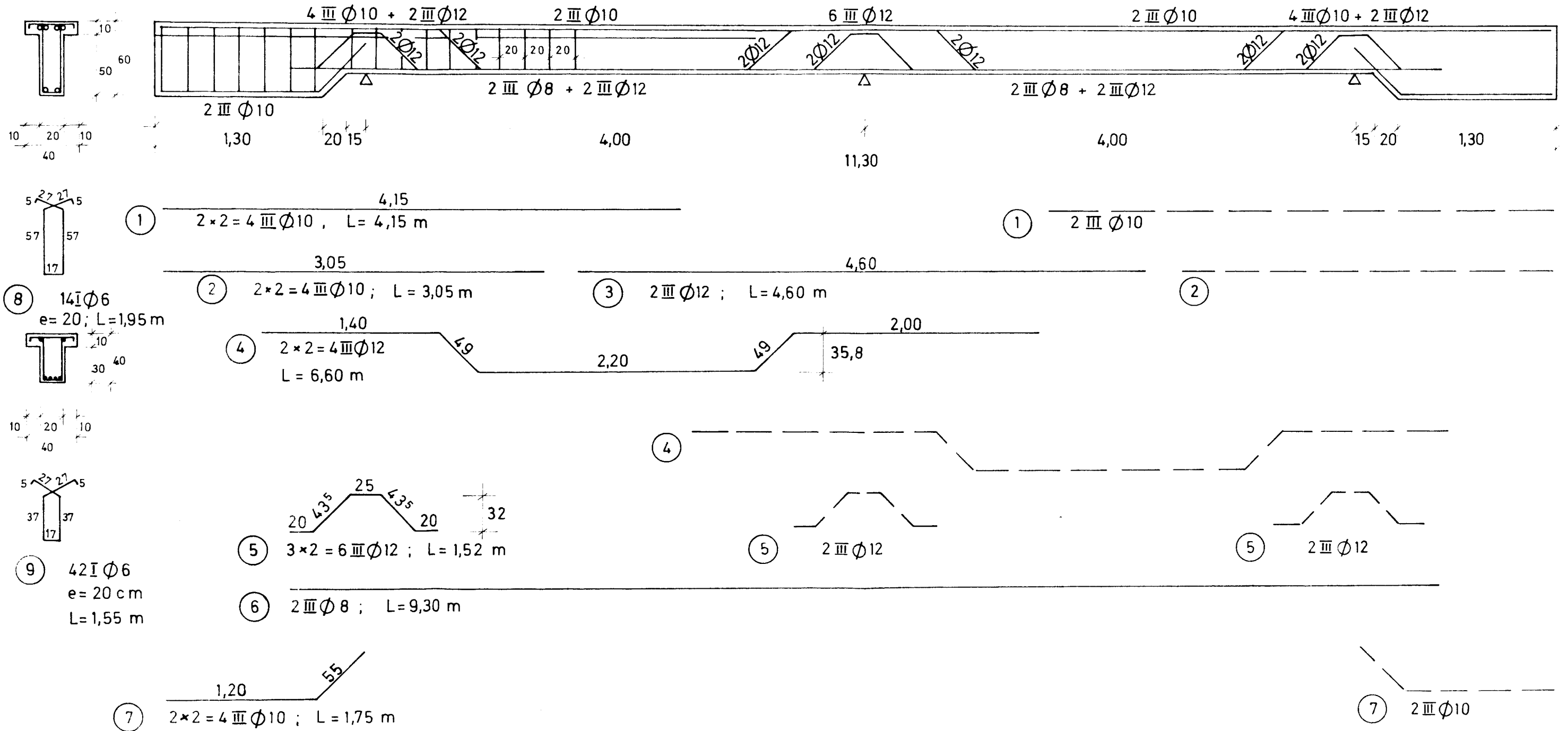
3 2 III Ø 12

6 2 III Ø 14 ; L = 1,52 m

4 2 III Ø 12 ; L = 8,20 m

Nr	Stck	Ø	L	L _{ges}		
				III Ø 12	I Ø 6	III Ø 14
1	4	I 6	2,00		8,00	
2	2	III 12	4,20	8,40		
3	4	"	5,65	22,60		
4	2	"	8,20	16,40		
5	41	I 6	1,55		63,55	
6	2	III 14	1,52			3,04
L [m]				47,40	71,55	3,04
G [kg]					16	

Schal- und Bewehrungsplan	Balken II
Durchlaufträger unter Feuerangriff	Anlage 7.2
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



Stahlliste

Nr	Stck	Ø	L	L _{ges}			
				III Ø12	III Ø10	III Ø8	I Ø6
1	4	III 10	4,15		16,60		
2	4	"	3,05		12,20		
3	2	III 12	4,60	9,20			
4	4	"	6,60	26,40			
5	6	"	1,52	9,12			
6	2	III 8	9,30			18,60	
7	4	III 10	1,75		7,00		
8	14	I 6	1,95				27,30
9	42	"	1,55				65,10
L [m]				44,72	35,80	18,60	92,40
G [kg]				40	22	7	21

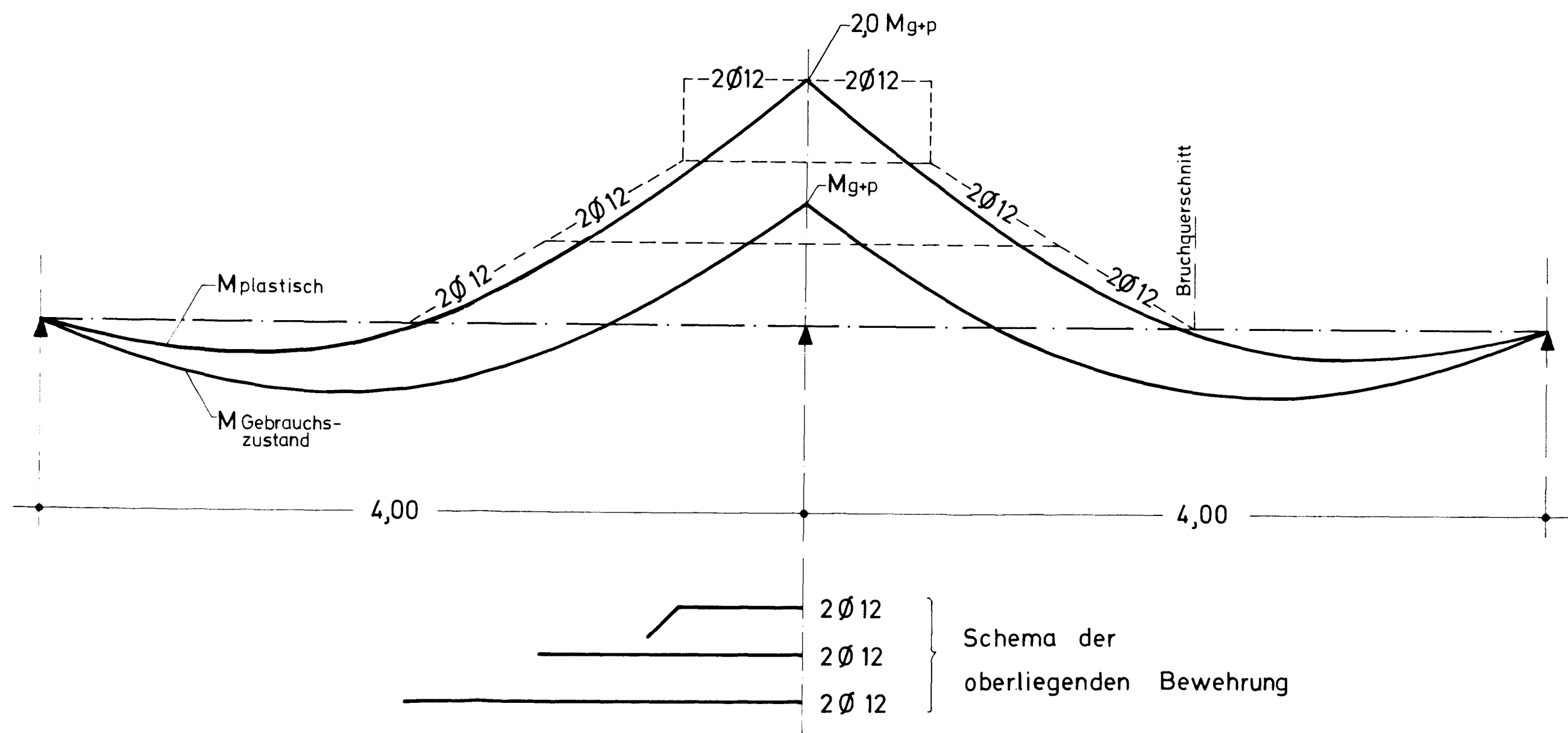
Schal- und Bewehrungsplan

Balken III

Durchlaufträger unter Feuerangriff

Anlage 7.3

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



B 300 / St. III b (Rippentorstahl)

Verankerungslänge der Stähle: $a_6 = 60 d$

Stahldeckung des plastischen Momentes

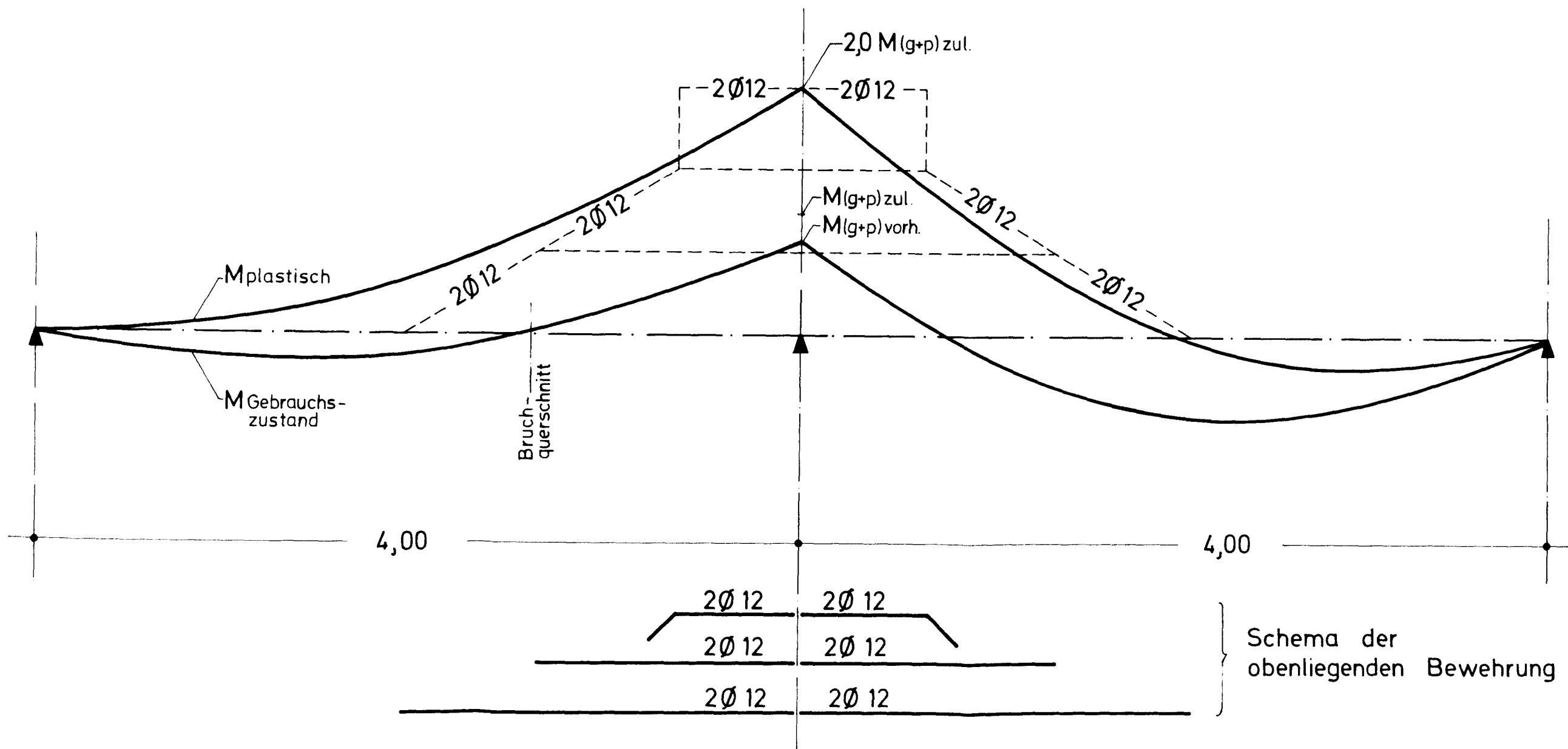
Balken I

Durchlaufträger unter Feuerangriff

Anlage 8.1

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig

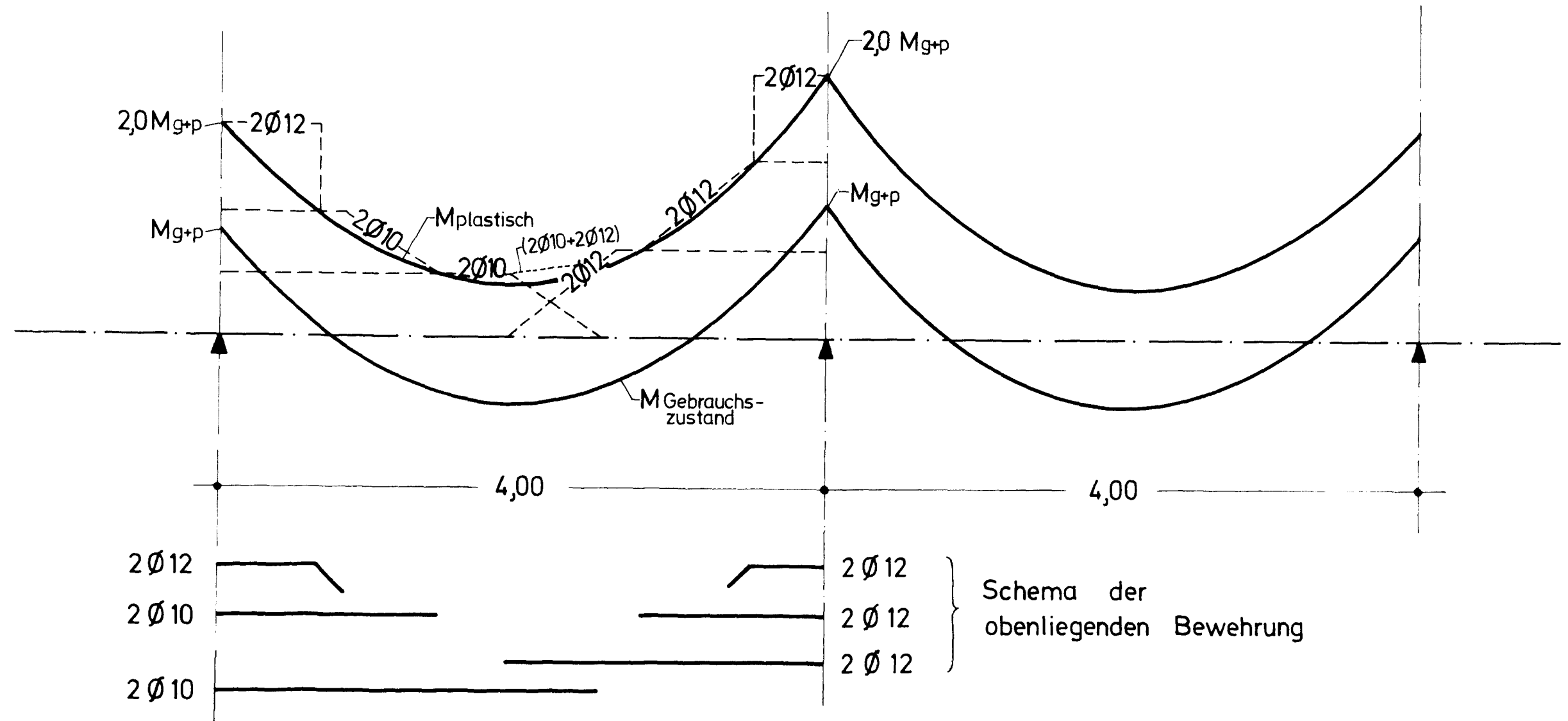
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



B 300 / St. IIIb (Rippentorstahl)

Verankerungslänge der Stähle : $a_6 = 60 d$

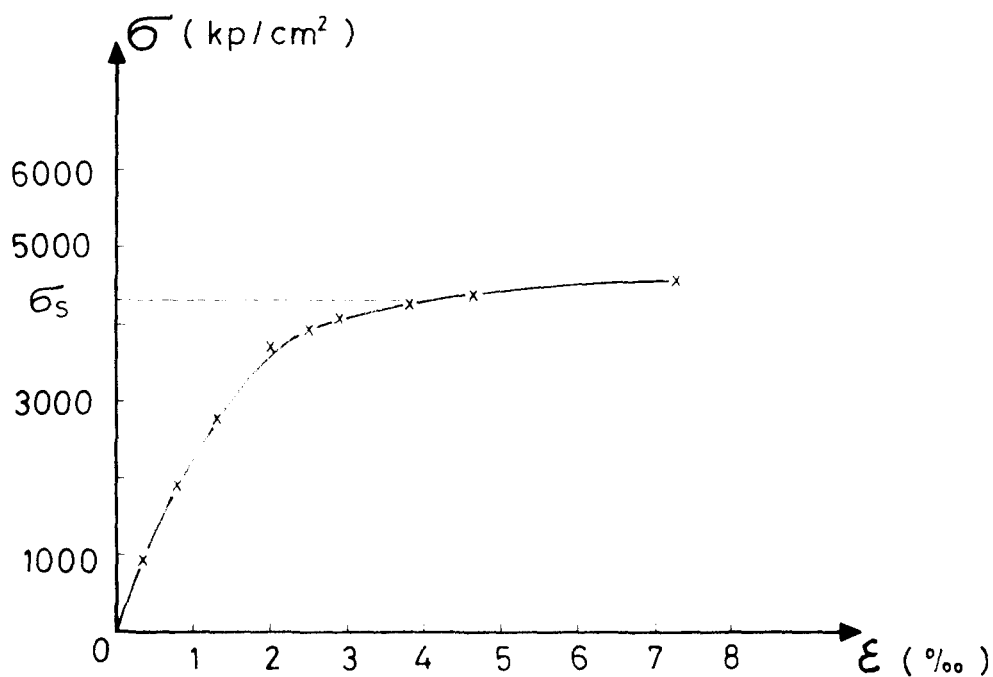
Stahldeckung des plastischen Momentes	Balken II
Durchlaufträger unter Feuerangriff	Anlage 8.2
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



B 300 / St. III b (Rippentorstahl)

Verankerungslänge der Stähle: $a_6 = 60 d$

Stahldeckung des plastischen Momentes	Balken III
Durchlaufträger unter Feuerangriff	Anlage 8.3
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



St. III b Ø 12

$$\sigma_s = 4290 \text{ kp/cm}^2$$

$$\sigma_B = 5406 \text{ kp/cm}^2$$

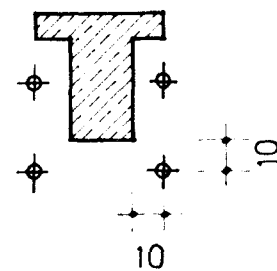
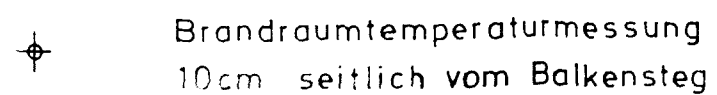
Spannungs - Dehnungsdiagramm
des verwendeten Stahls St III b

Durchlaufträger unter Feuerangriff

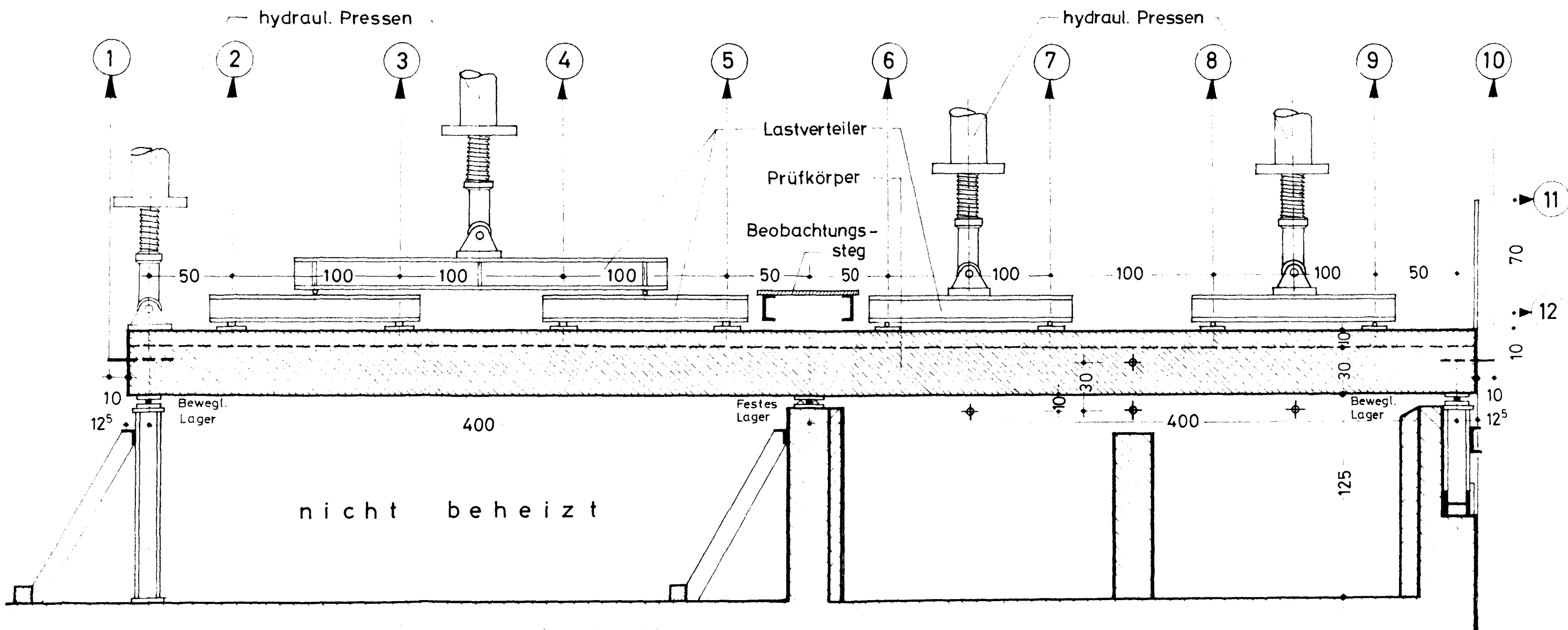
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage

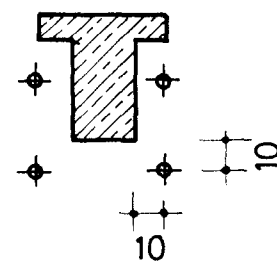
9



<http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00063120>



✦ Brandraumtemperaturmessung
10cm seitlich vom Balkensteg



① — ⑫ Durchbiegungsmeßstellen

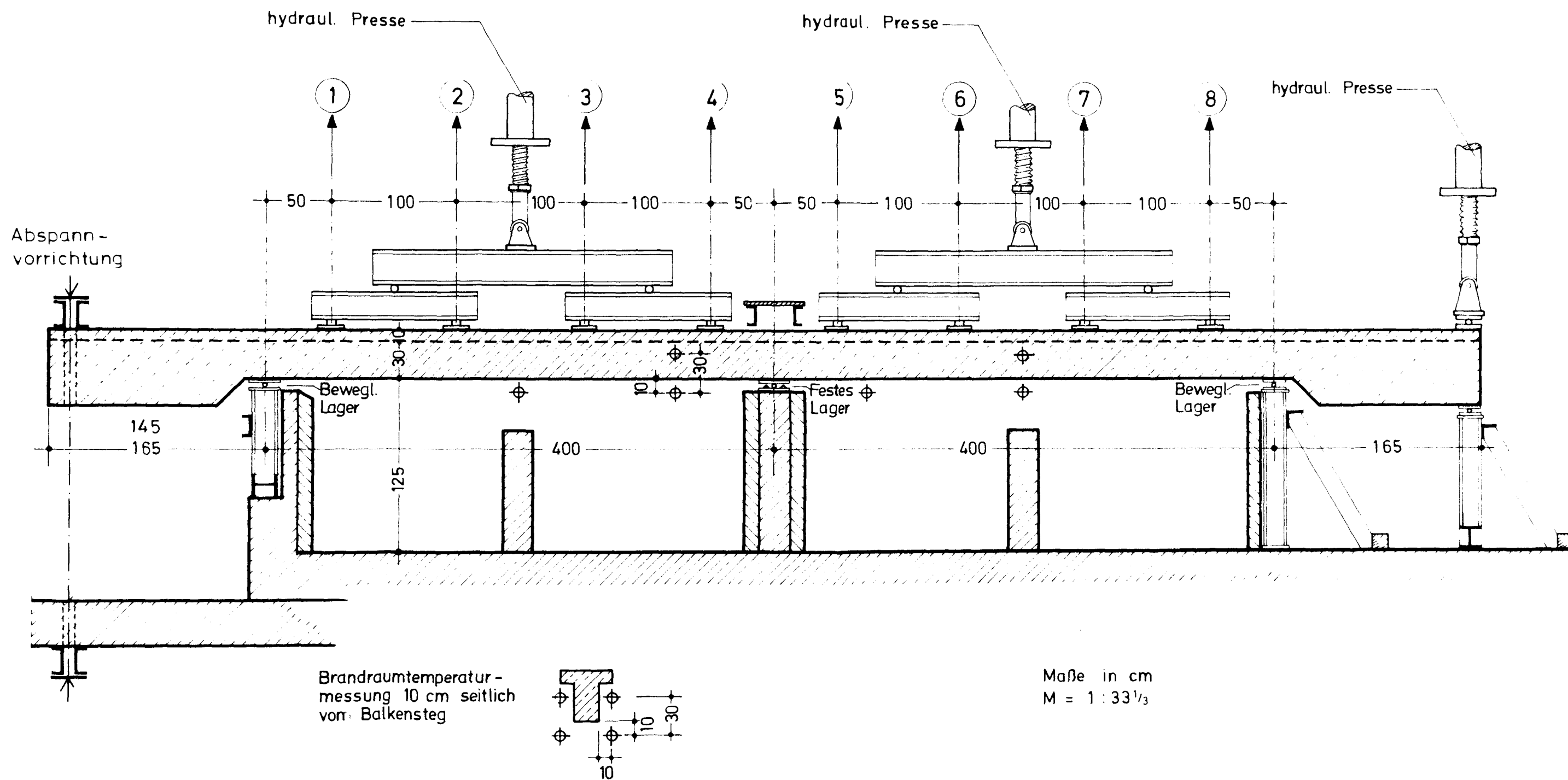
Versuchsanordnung

Balken II

Durchlaufträger unter Feuerangriff

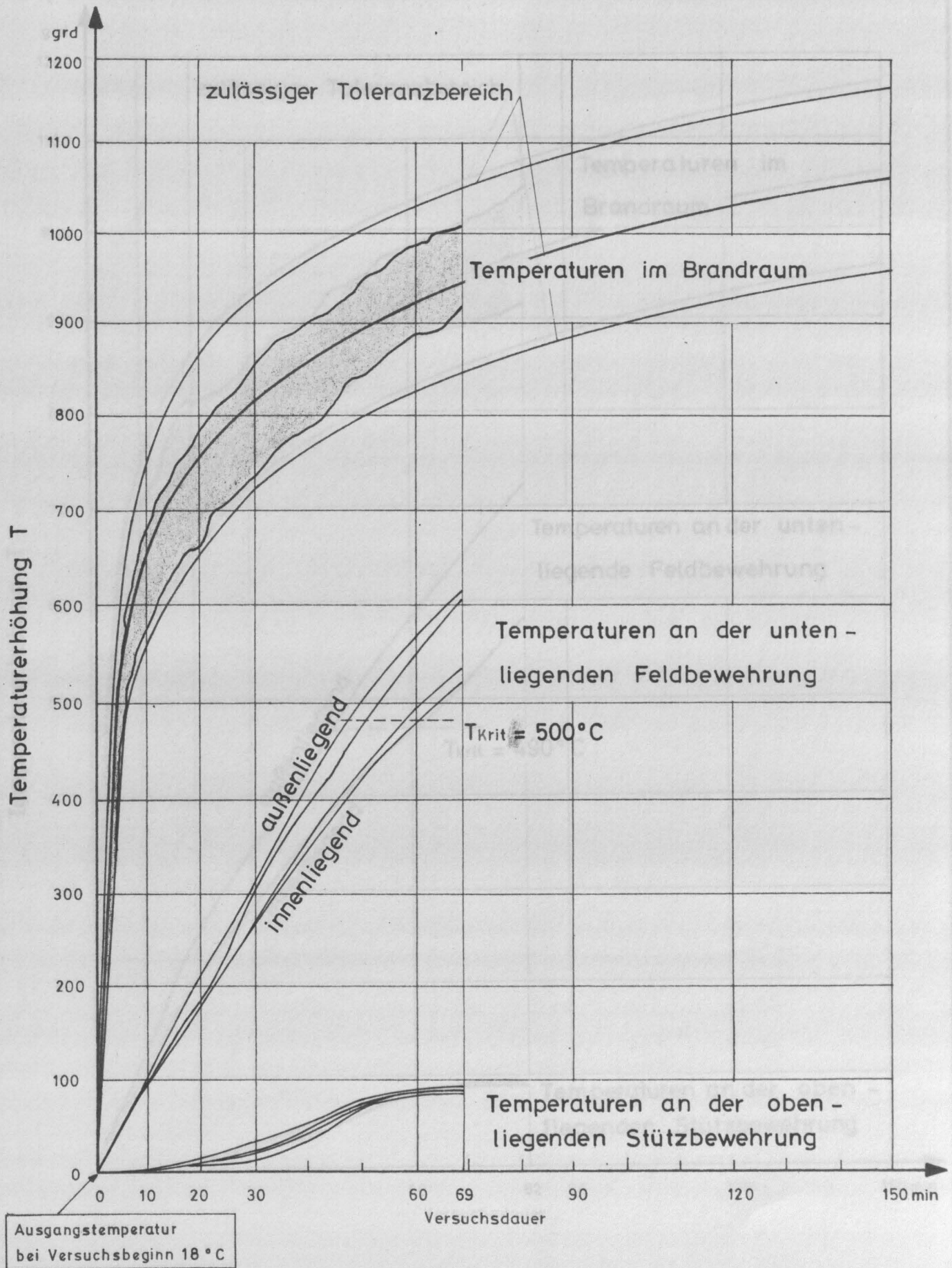
Anlage 10.2

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



⊕ Brandraumtemperaturmessung
1-8 Durchbiegungsmeßstellen

Versuchsanordnung	Balken III
Durchlaufträger unter Feuerangriff	Anlage 10.3
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliches Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



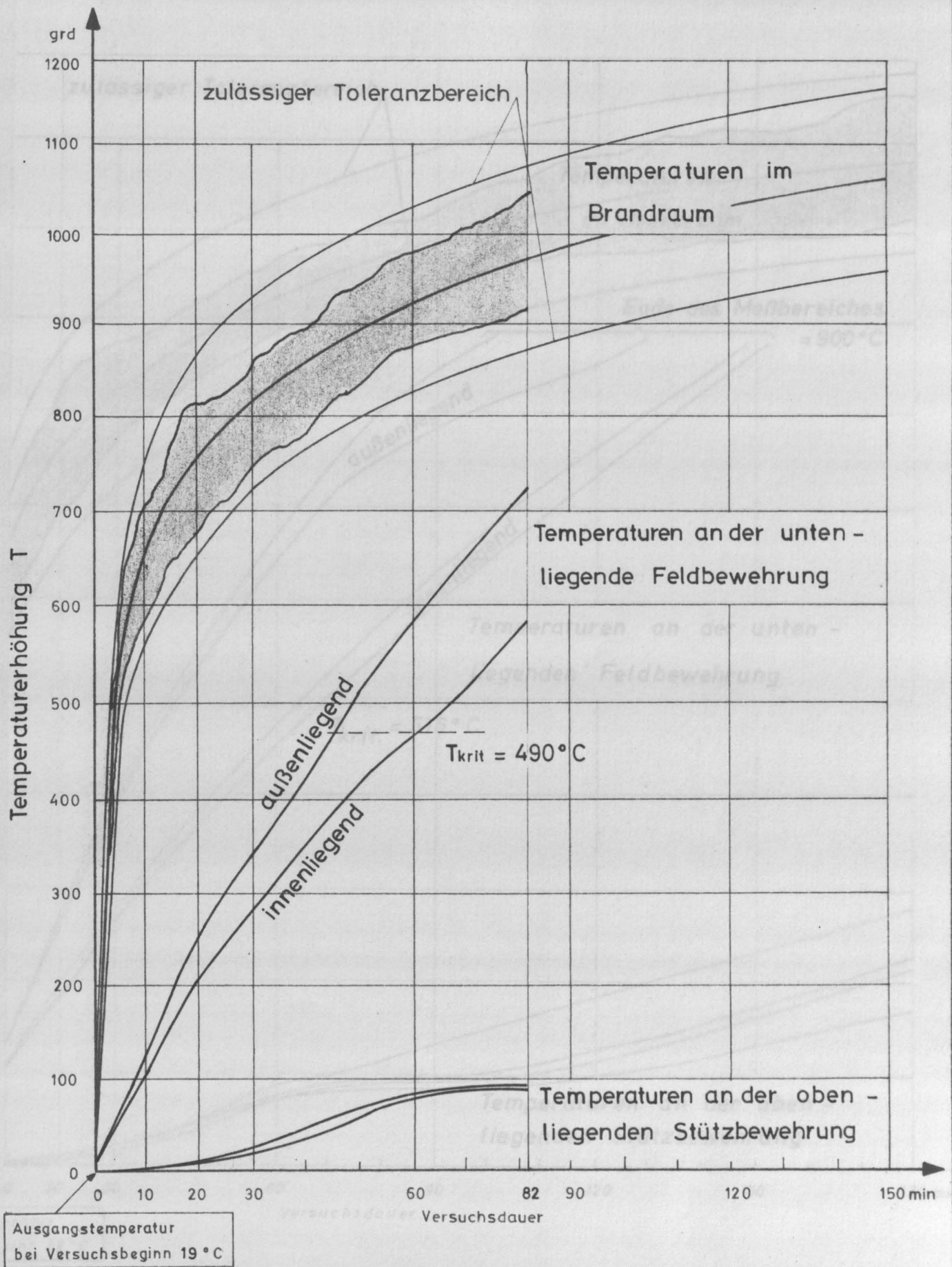
Temperaturen im Brandraum und am Bewehrungsstahl

Balken I

Durchlaufträger unter Feuerangriff

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 11.1



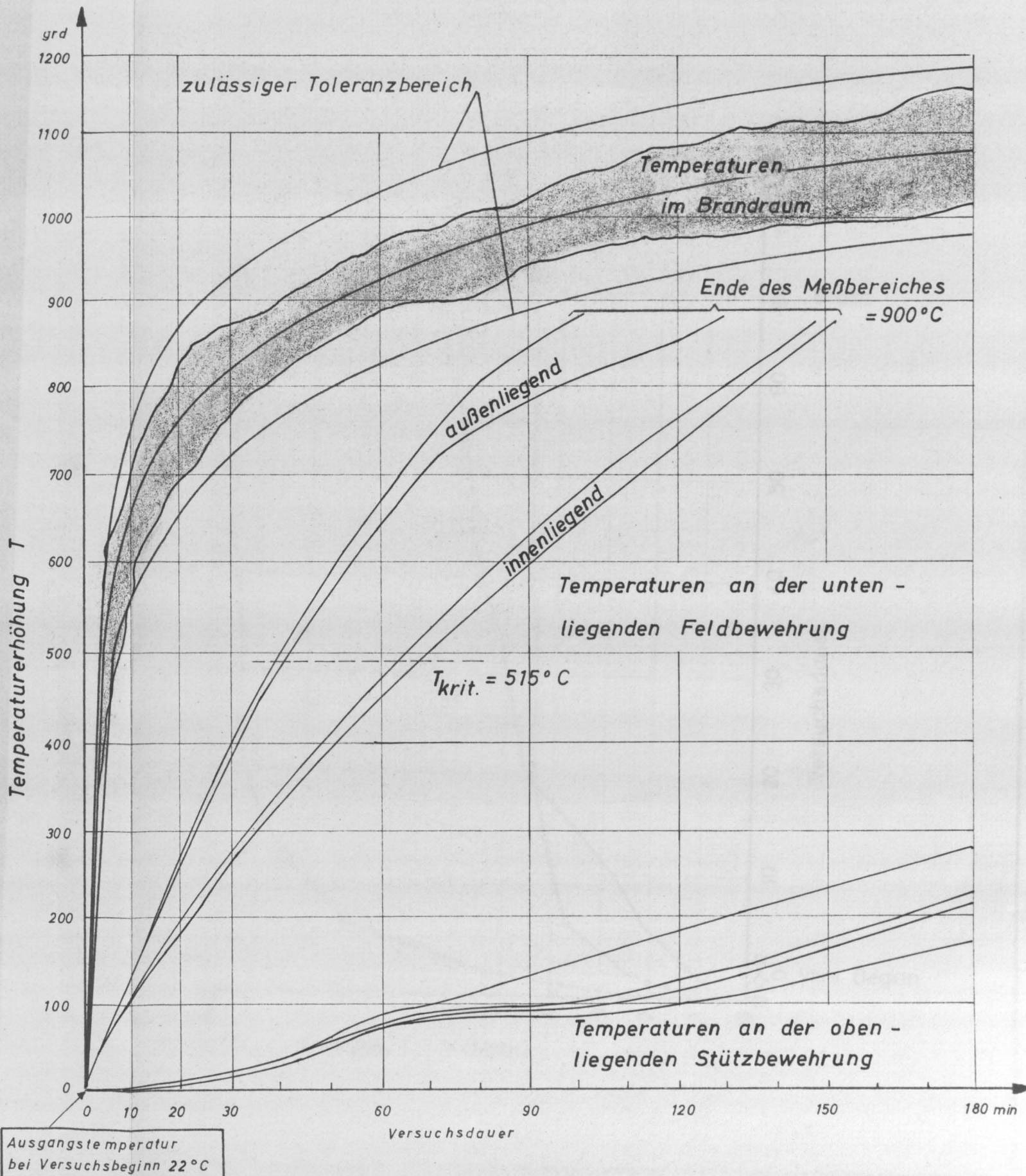
Temperaturen im Brandraum und am Bewehrungsstahl

Balken II

Durchlaufträger unter Feuerangriff

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 11.2



Temperaturen im Brandraum und am Bewehrungsstahl

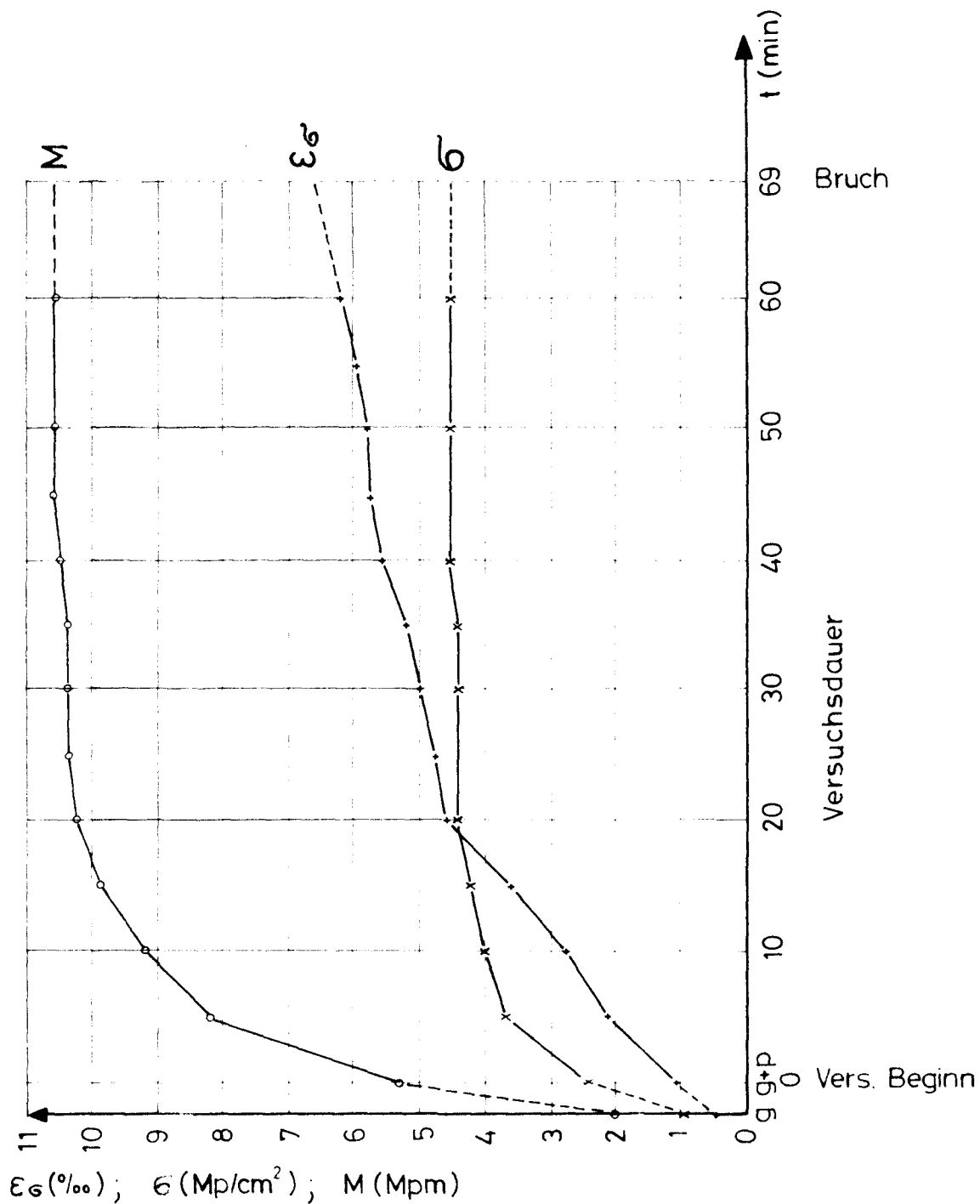
Balken III

Durchlaufträger unter Feuerangriff

Anlage 11.3

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Änderung der Stahldehnung und- Spannung
und des Momentes über der Mittelstütze

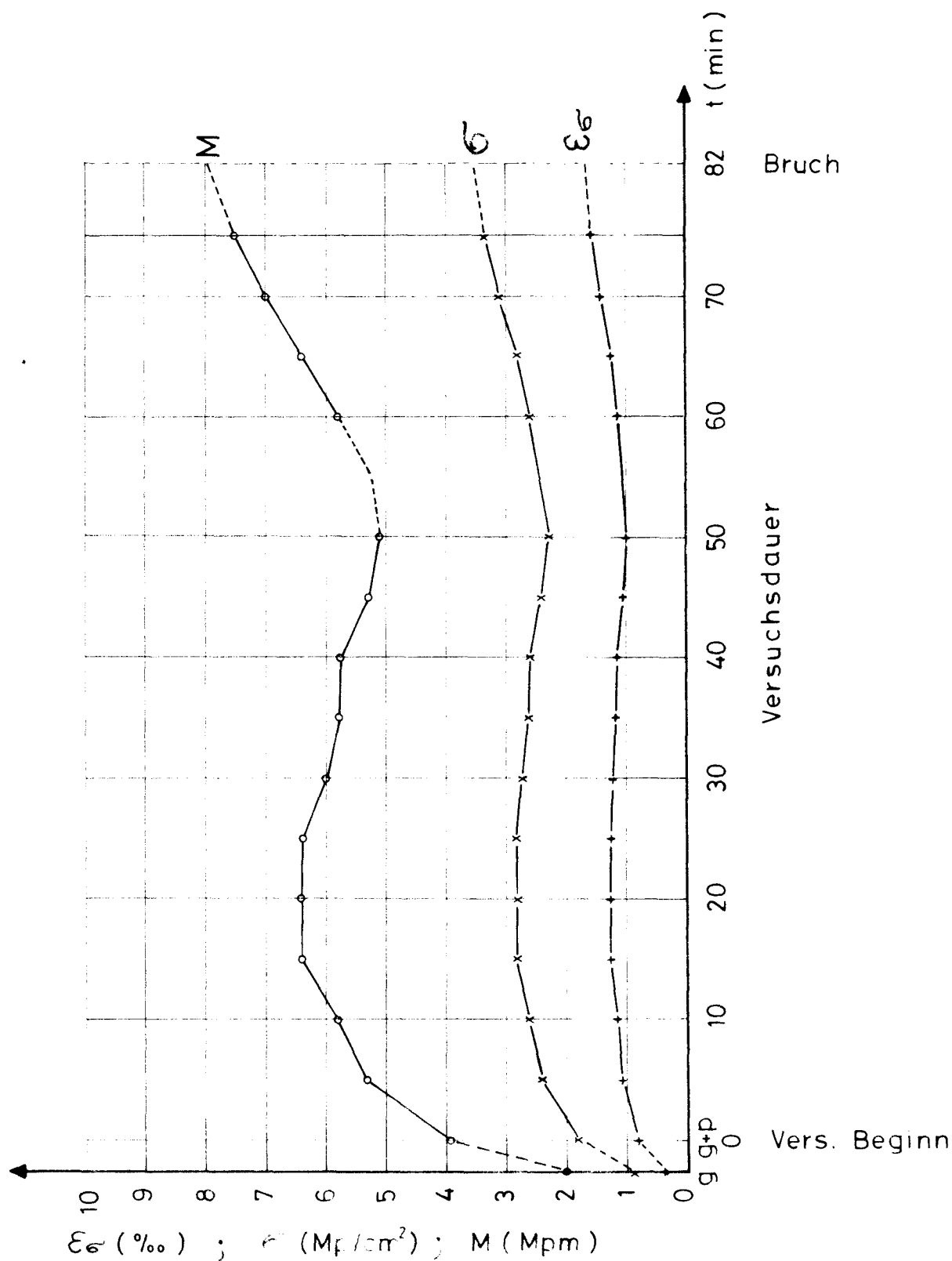
Balken I

Durchlaufträger unter Feuerangriff

Anlage

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig

12.1



Änderung der Stahldehnung und-Spannung
und des Momentes über der Mittelstütze

Balken II

Durchlaufträger unter Feuerangriff

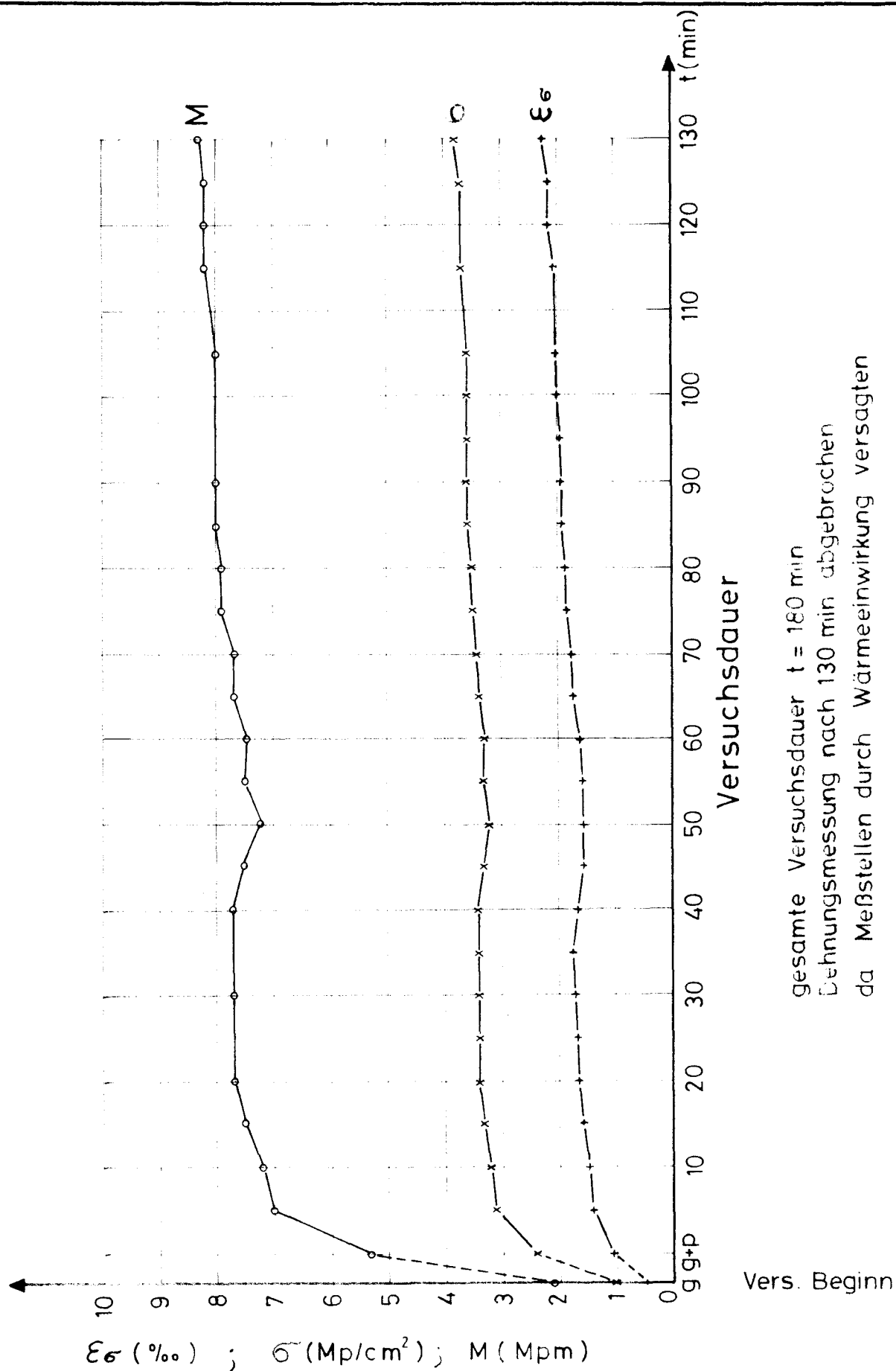
Anlage

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau

12.2

Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Änderung der Stahldehnung und-Spannung
und des Momentes über der Mittelstütze

Balken III

Durchlaufträger unter Feuerangriff

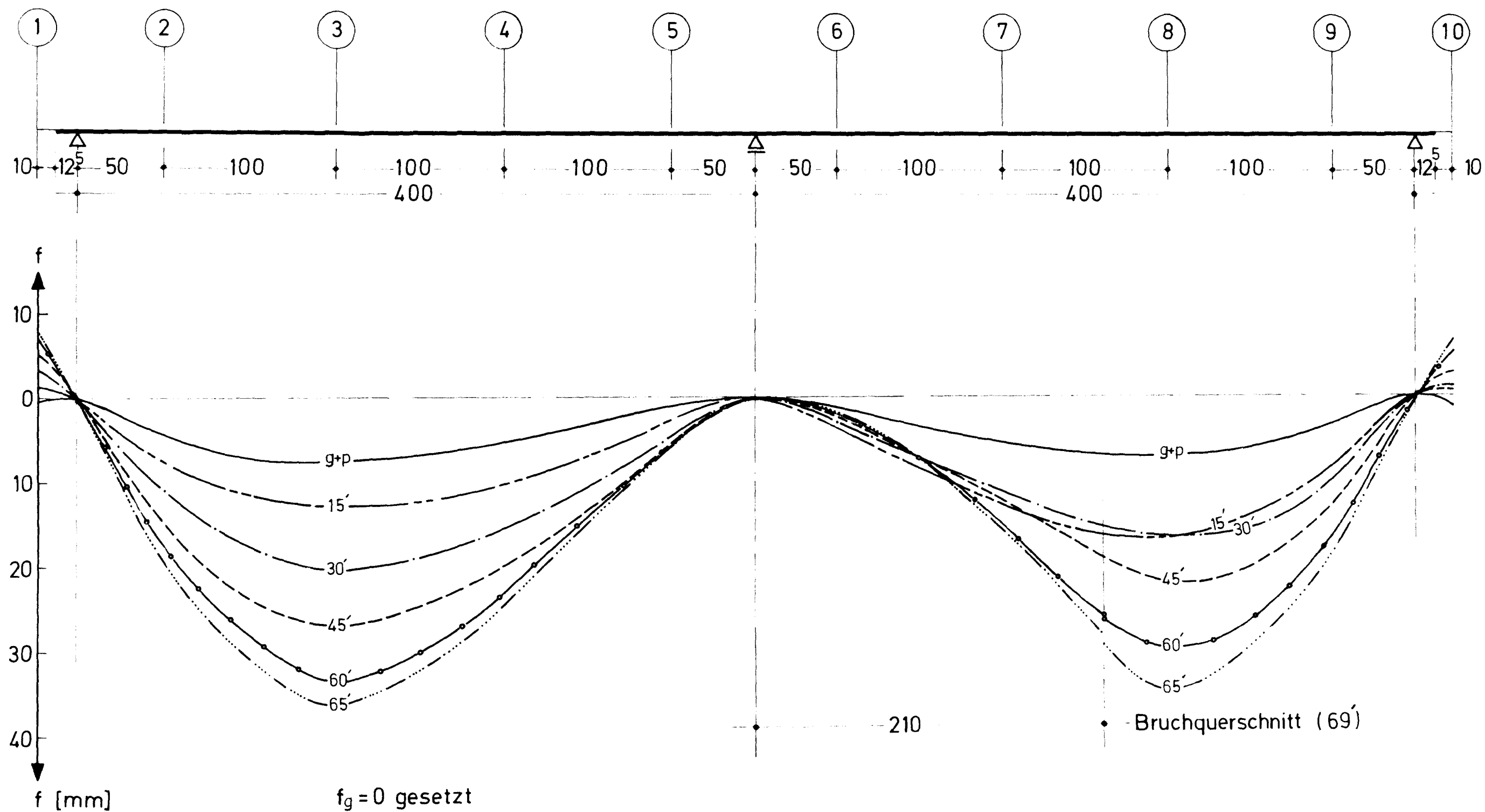
Anlage

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau

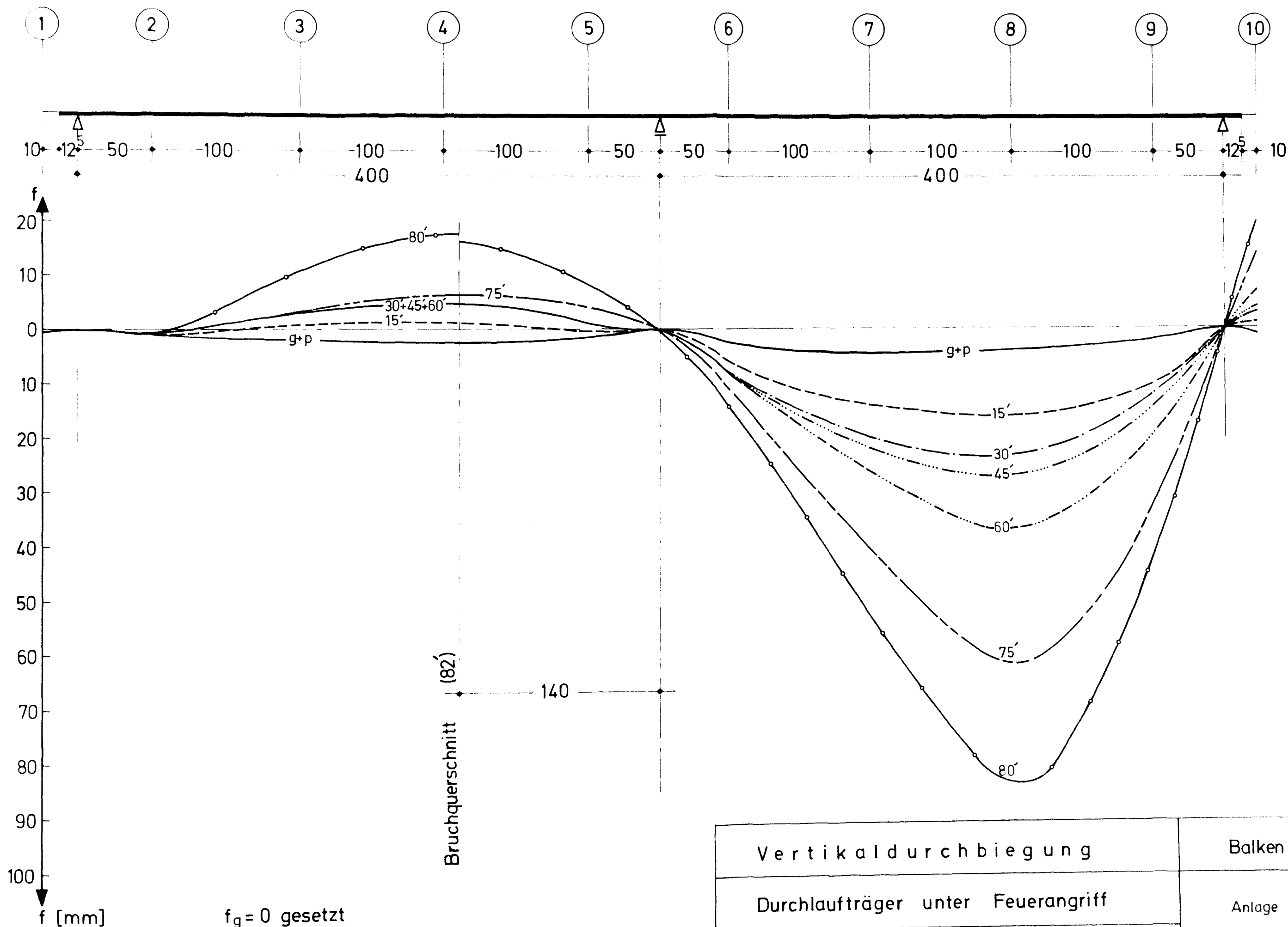
12. 3

Technische Universität Braunschweig

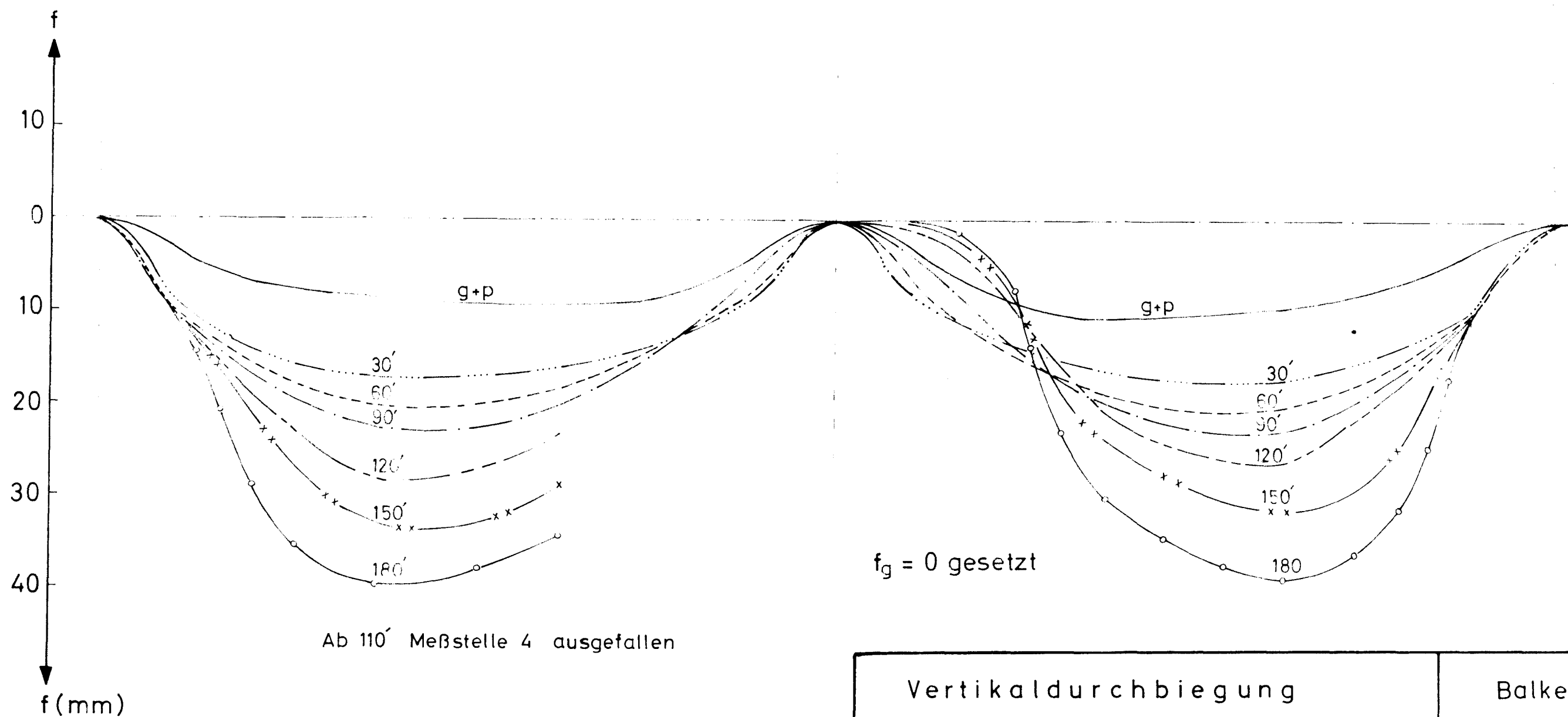
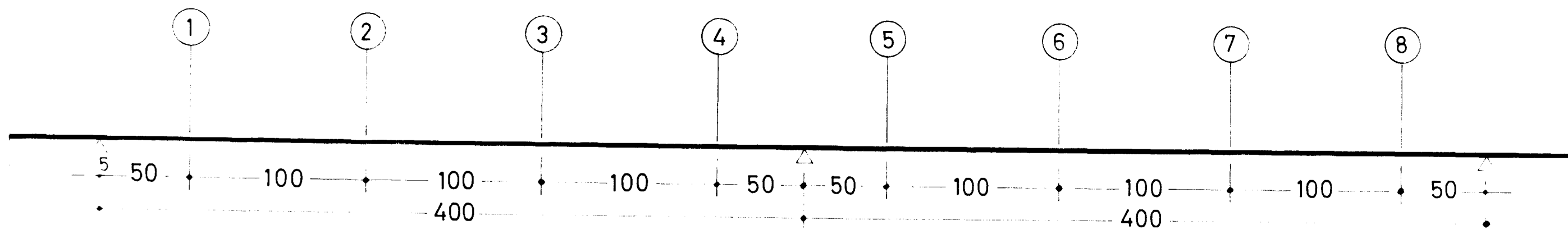
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



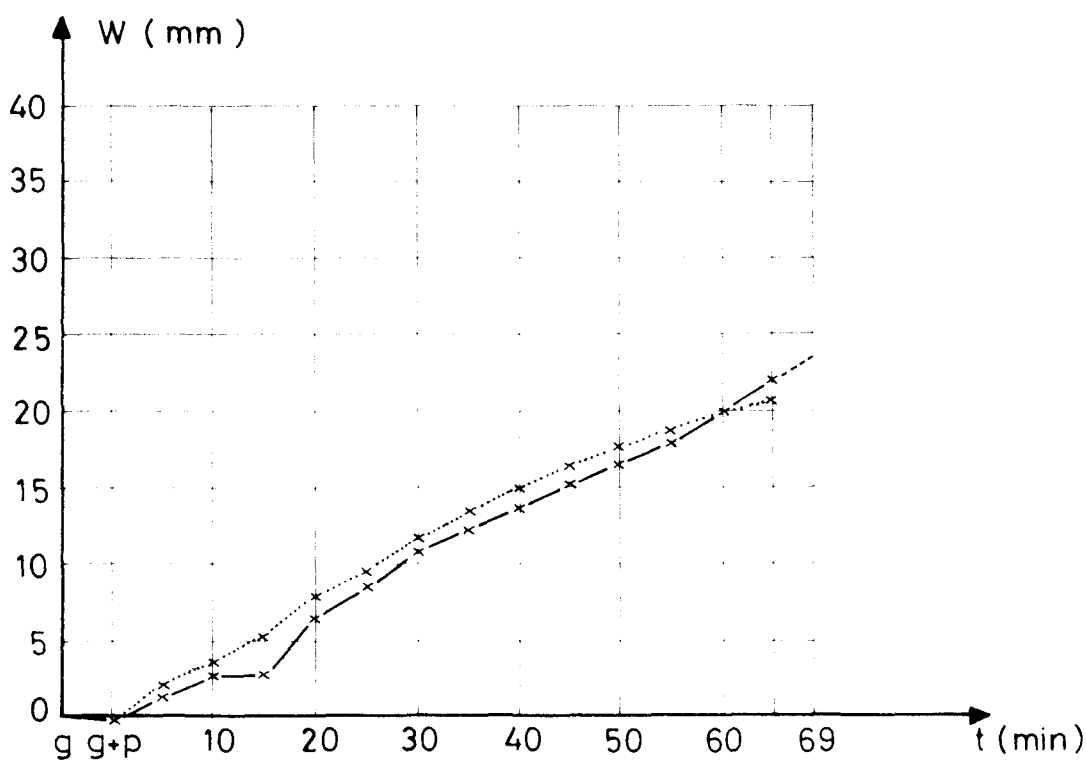
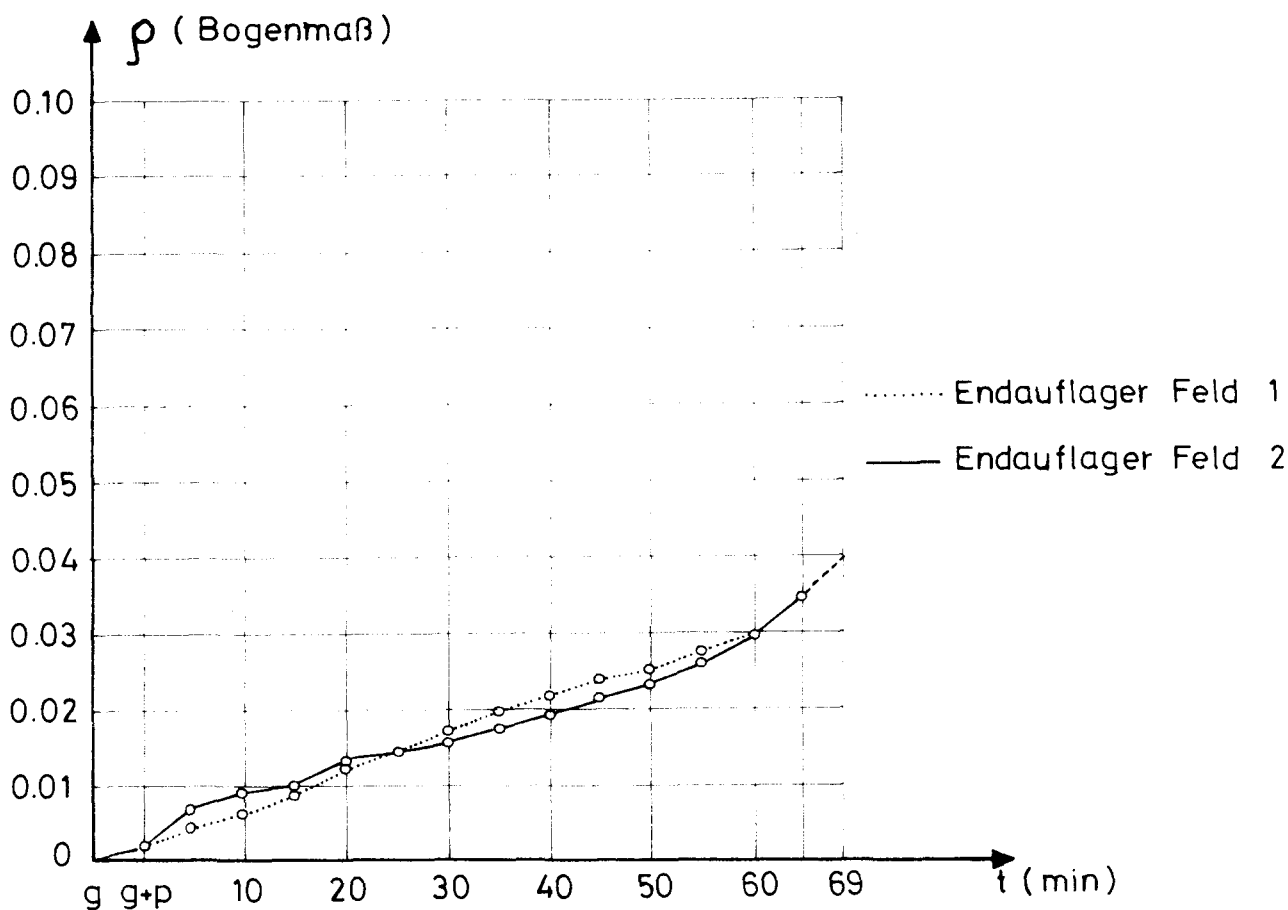
Vertikaldurchbiegung	Balken I
Durchlaufträger unter Feuerangriff	Anlage 13.1
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



Vertikaldurchbiegung	Balken II
Durchlaufträger unter Feuerangriff	Anlage 13.2
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



Vertikaldurchbiegung	Balken III
Durchlaufträger unter Feuerangriff	Anlage 13.3
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



Verdrehung und horizontale
Verschiebung der Endauflager

Balken I

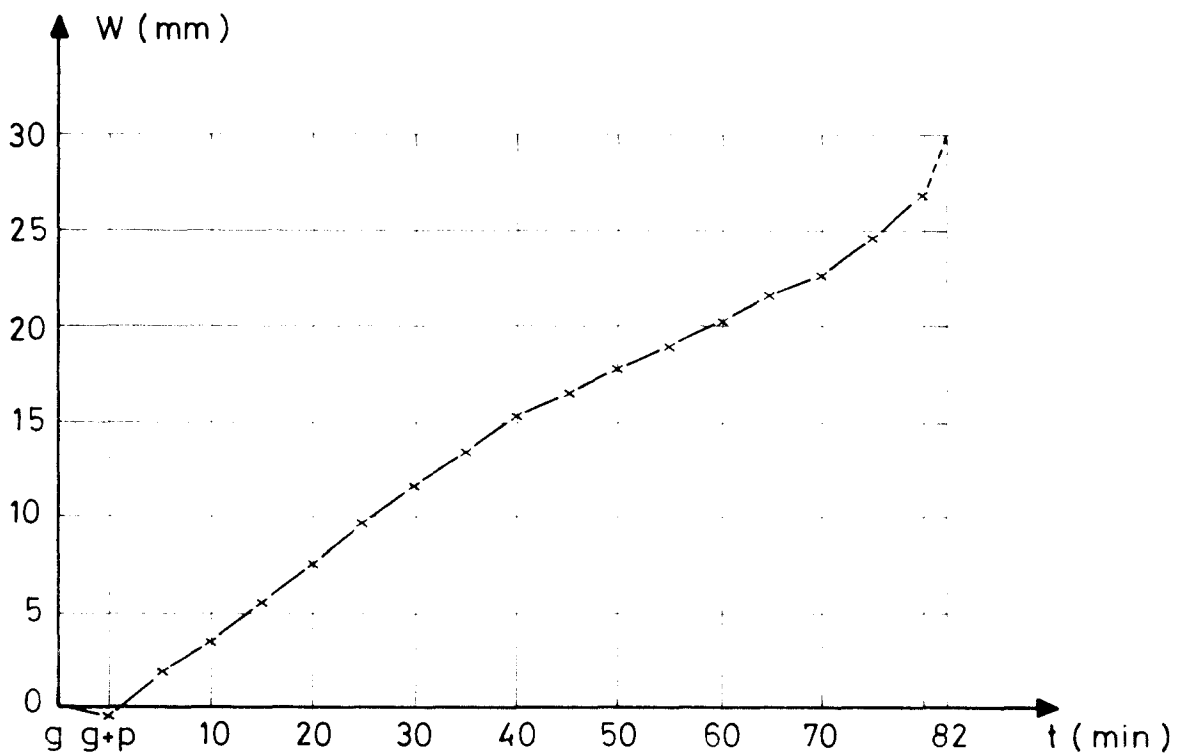
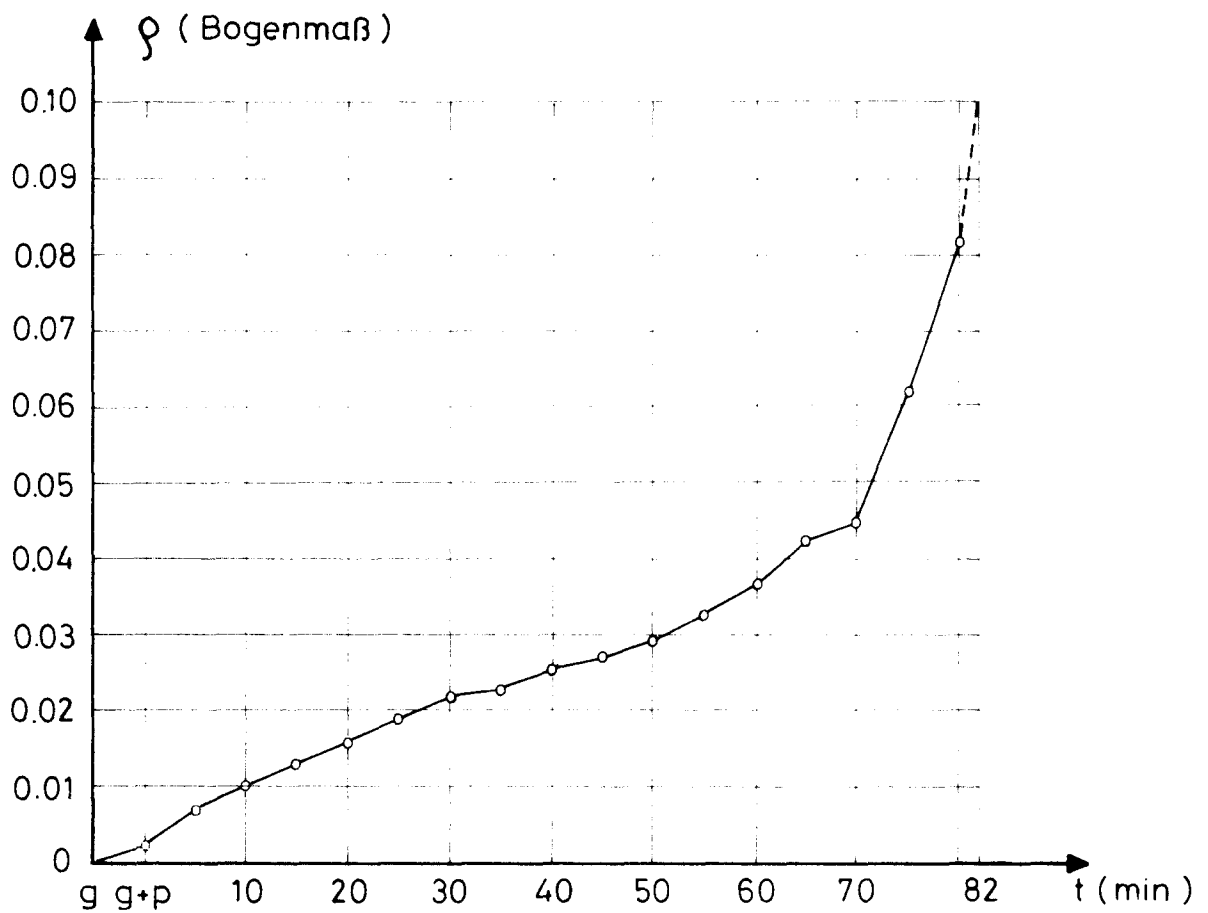
Durchlaufträger unter Feuerangriff

Anlage
14.1

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau

Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Verdrehung und horizontale
Verschiebung der Endauflager

Balken II

Durchlaufträger unter Feuerangriff

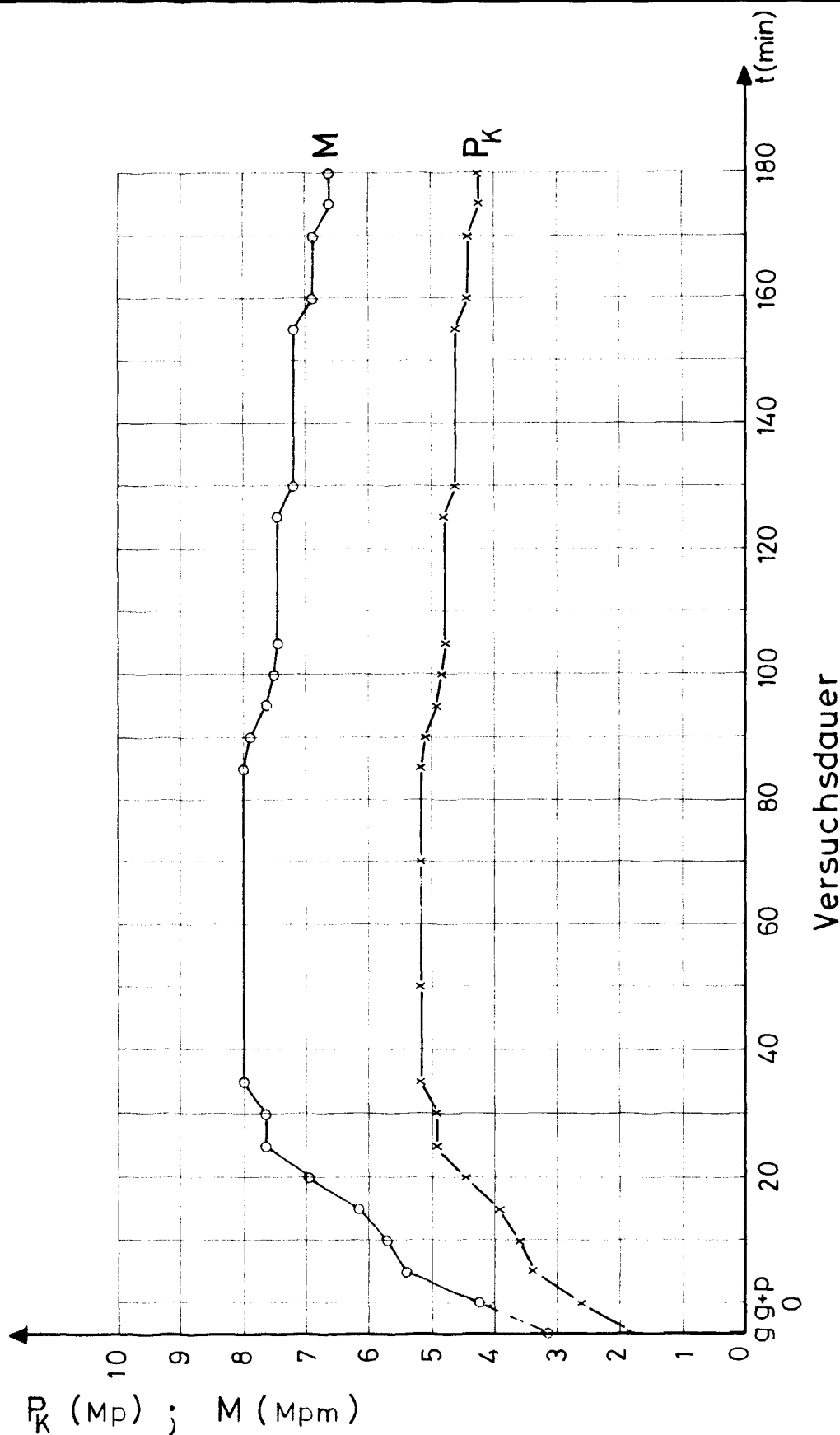
Anlage

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig

14.2

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

30/05/2016



Änderung der Zugkraft am Kragarm
und des Momentes über der Außenstütze

Balken III

Durchlaufträger unter Feuerangriff

Anlage 15

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen